

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

електроніки

(повна назва інституту/факультету)

мікроелектроніки

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

“ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 7.05080103 Мікроелектронні інформаційні системи
(код і назва)

на тему: Гнучкі резистивні сенсори на основі плівок наноцелюлози

Виконав: студент 2 курсу, групи ДП-92мп
(шифр групи)

Найдьонов Арсеній Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н., доц. Коваль В.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с.

Георгій СВЄЧНИКОВ

(підпис)

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н. Діденко Ю.В.

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань. Студент

(підпис)

Київ – 2020 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут (факультет) електроніки
(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 7.05080103 Мікроелектронні інформаційні системи
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)
«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

групи ДП-92мп Найдьорова Арсенія Олександровича

(група, прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту: Гнучкі резистивні сенсори на основі плівок наноцелюлози,
керівник проекту Коваль Вікторія Михайлівна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту: Гнучкі резистивні сенсори на основі плівок наноцелюлози з коефіцієнтом тензочутливості не менше 0,1% та величиною часової нестабільності при вигину 0,5 мм не більше 2-3%/хв").

4. Зміст пояснювальної записки (конкретні завдання на дипломний проект)

1.Розробка стенду для вимірювання залежності опору зразка від його згину.

2.Виготовлення стенду для вимірювання залежності опору зразка від згину.

3.Виготовлення гнучких резистивних сенсорів на основі плівок наноцелюлози.

4. Дослідження характеристик сенсорів на основі наноцелюлози.

5. Визначення впливу технології синтезу сенсорів на їх характеристики.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) 1.Графіки залежності опору сенсору в залежності від величини лінійного видовження зразка для різних технологій виготовлення сенсорів. 2. Графіки часової нестабільності сенсорів. 3.Принципова схема стенду

для вимірювання залежності опору від згину зразка. 4. Принцип обчислення лінійного видовження тестового зразка в залежності від його згину.

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01.09.2020 .

Календарний план виконання

№	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1.	Літературний огляд.	01.09.20-15.09.20	
2.	Розробка стенду для вимірювання залежності опору зразка від його згину.	16.09.20-24.09.20	
3.	Виготовлення стенду для вимірювання залежності опору зразка від згину.	25.09.20-01.10.20	
4.	Виготовлення гнучких резистивних сенсорів на основі плівок наноцелюлози.	02.10.20-15.10.20	
5.	Дослідження характеристик існуючих промислових резистивних сенсорів.	16.10.20-20.10.20	
6.	Дослідження характеристик сенсорів на основі плівок наноцелюлози.	21.10.20-25.10.20	
7.	Оформлення дипломної роботи.	26.10.20-30.11.20	

Студент


(підпис)

А. О. Найдьонов

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

В.М. Коваль

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 84 сторінках, вона містить 5 розділів, 21 ілюстрацію, 37 таблиць і 39 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є сенсори механічних полів на основі наноцелюлози.

Предмет роботи – розробка сенсорів механічних полів на основі тонких плівок наноцелюлози.

Мета роботи – розробити сенсори механічних полів на основі підкладок з тонких плівок наноцелюлози.

В першому розділі надано літературний огляд, в якому розглядаються матеріали підкладок для гнучкої електроніки.

В другому розділі роботи наведено методику дослідження сенсорів механічних полів. Дано поняття тензоефект, а також поняття лінійного видовження.

В третьому розділі описується розробка стенду для повторюваного вимірювання параметрів гнучких сенсорів механічних полів, описується послідовність дій при роботі з ним, а також проводиться оцінка його працездатності.

В четвертому розділі проводиться дослідження гнучких резистивних сенсорів на основі плівок наноцелюлози. Описується методика синтезу сенсорів, вимірюються їх характеристики та проводиться порівняння залежності характеристик від технології їх виробництва.

У п'ятому розділі наведена розробка стартап-проекту.

В шостому розділі представлені висновки щодо проробленої роботи.

В сьомому розділі наведений перелік використаної літератури.

НАНОЦЕЛЮЛОЗА, ТЕНЗОЕФЕКТ, ТОНКІ ПЛІВКИ, НІКЕЛЬ,
ТЕНЗОРЕЗИСТОР, КОЕФІЦІЄНТ ТЕНЗОЧУТЛИВОСТІ, ЛІНІЙНЕ
ВИДОВЖЕННЯ

ABSTRACT

The work is set out on 84 pages, it contains 5 sections, 21 illustrations, 37 tables and 39 sources in the list of references.

The object of the study are sensors of mechanical fields based on nanocellulose.

The subject of work is the development of mechanical field sensors based on thin nanocellulose films.

The purpose of the work is to develop mechanical field sensors based on substrates made of thin nanocellulose films.

The first section provides a literature review, which examines the materials of substrates for flexible electronics

In the second section of the work the method of research of sensors of mechanical fields is given. The notion of strain effect is given as well as the notion of linear healing.

The third section describes the development of a stand for repetitive measurement of the parameters of flexible sensors of mechanical fields, describes the sequence of actions when working with it, as well as an assessment of its performance.

In the fourth section, the study of flexible resistive sensors based on nanocellulose films is carried out. The method of synthesis of sensors is described, their characteristics are measured and the dependence of characteristics on technologies of their production is compared.

The fifth section is the development of a startup project.

The sixth section presents the conclusions on the work done.

The seventh section provides a list of references.

NANOCELLULOSE, PIEZORESISTIVE EFFECT, THIN FILMS, NICKEL, PIEZORESISTIVE SENSOR, PIEZORESISTIVE COEFFICIENT, LINEAR EXTENSION.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ABSTRACT	5
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ПІДКЛАДОК ДЛЯ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ	11
1.3. Целюлоза та наноцелюлоза.....	17
Ступінь кристалічності і кристалічна структура.	22
2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ СЕНСОРІВ МЕХАНІЧНИХ ПОЛІВ.....	27
2.3. Висновки та вимоги до вимірювального стенду.....	32
3. РОЗРОБКА СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ГНУЧКИХ СЕНСОРІВ ТЕНЗОЕФЕКТУ	33
3.1. Будова та опис механічної частини стенду	33
3.3. Лістинг програмного забезпечення для проведення вимірювань	39
3.4. Методика проведення вимірювань за допомогою стенду.....	40
4. ДОСЛІДЖЕННЯ ГНУЧКИХ РЕЗИСТИВНИХ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ПЛІВОК НАНОЦЕЛЮЛОЗИ.....	43
5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	63
5.1. Опис ідеї проекту	63
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту.....	65
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	66
5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	71
5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	73

Висновки.....	76
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	78

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

НЦ – наноцелюлоза;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ІЧ – інфрачервоний;

НЧ – наночастинки;

ПВХ – полівінілхлорид;

УФ – ультрафіолет;

CNF – целюлозні нановолокна;

MFC – мікроволокниста целюлоза;

CNC – нанокристали целюлози;

ТЕМ – просвічуюча електронна мікроскопія;

SEM – скануюча електронна мікроскопія;

AFM – атомно-силова мікроскопія;

WAXS – ширококутне рентгенівське розсіювання.

ВСТУП

Гнучка електроніка з кожним роком все сильніше і сильніше входить у наше життя. Гнучкі сенсори, дисплеї, прилади, усе це вже не здається дивним, як це було десятки років тому. В останні роки найсильніше еволюціонували гнучкі сенсори. Малий розмір дозволяє легко інтегрувати їх в бездротові, портативні і мережеві рішення. Ці датчики ідеально підходять для моніторингу стану навколишнього середовища, промислових і житлових приміщень завдяки їх високій продуктивності, низькій вартості і невеликих розмірів.

Малі товщини шарів і, як наслідок, зміна електричних параметрів при зміні складу матеріалу (окислення, насичення вологою, дегідратація і т. д.) дозволяє створювати чутливі малорозмірні датчики. Зміна електричних параметрів структури дозволяє реєструвати зміну різних зовнішніх факторів, таких як температура, механічні впливи, вологість, вміст різних газів, речовин і т. д.

Датчики вологості, температури, тензодатчики, та багато інших. У цій роботі увага буде приділена тензорезисторам.

Зазвичай сучасні тензорезистори являють собою чутливий елемент у вигляді зигзагоподібного провідника, нанесеного на гнучку підкладку. Тензорезистор приклеюється підкладкою на поверхню досліджуваного на предмет деформації об'єкта. Провідники тензорезисторів зазвичай виготовляються з тонкого металевого дроту, фольги, або напилюється в вакуумі для отримання плівки напівпровідника або металу. В якості підкладки зазвичай використовують тканину, папір, полімерну плівку, слюду і ін. Для приєднання чутливого елемента в електричний ланцюг тензорезистор має вивідні дратові кінці або контактні площадки. Плівкові металеві тензорезистори мають площу близько 2-10 мм².

Усі ці технології забруднюють навколишнє середовище. В даний момент проблема забруднення навколишнього середовища у світі стоїть дуже гостро, тому в даній роботі для побудови гнучких сенсорів механічних полів в якості підкладки пропонується використати наноцелюлозу, що здатна розкладатись у

природі самочинно і технологічний процес виготовлення якої є екологічно дружнім, чистим.

Тому мета даної роботи – розробка гнучких тензорезистивних сенсорів на основі плівок наноцелюлози для біорозкладної електроніки. При цьому необхідно було вирішити наступні завдання:

- розробити та виготовити стенд для вимірювання залежності опору тензорезистора від його вигину;
- синтезувати гнучкі тензорезистивні сенсори на основі плівок наноцелюлози;
- провести вимірювання тензочутливих та стабільностних характеристик сенсорів;
- встановити вплив технології синтезу сенсорів на їх робочі характеристики.

1. АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ПІДКЛАДОК ДЛЯ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

Якщо говорити в цілому – підкладки для гнучкої електроніки виконують дуже важливу роль. По-перше, підкладка служить діелектричною та механічною основою для електронних компонентів, а також тепловідводом. По-друге, параметри основи та її обробка суттєво впливають на параметри шарів осаджуваних плівок (особливо в тонкоплівковій технології) та надійність всієї гнучкої схеми в цілому.

Для забезпечення заданих електричних параметрів матеріал основи повинен мати:

- високий коефіцієнт теплопровідності для ефективної передачі тепла від паливних елементів;
- високу механічну міцність, що забезпечує цілісність основи з нанесеними елементами;
- високу хімічну інертність до осаджувальних матеріалів, що зменшує тимчасову нестабільність параметрів елементів плівки, що обумовлено фізико-хімічними процесами на межі розділу плівка / підкладка та проникненням іонів із підкладки у плівку. Наявність легко рухомих лужних елементів у підкладках може призвести до значного збільшення поверхневої провідності і навіть корозії плівок, тому в таких випадках на поверхню підкладок наноситься шар оксиду, який не має іонної провідності в робочих умовах;
- стійкість до впливу високої температури під час формування елементів та монтажу навісних компонентів;
- стійкість до впливу хімічних реагентів у процесі підготовки поверхні основи перед нанесенням плівок, під час електрохімічної обробки та хімічного осадження плівок;
- мінімальну шорсткість поверхні, особливо не хвилясту, що впливає на чіткість ліній у фотолітографії;
- високу щільність для виключення інтенсивного газоутворення;
- здатність до хорошої механічної обробки (полірування, різання).

На даний момент не існує матеріал, котрий в однаковій мірі задовольняв би усі ці різноманітні вимоги. Багато органічних матеріалів не можуть бути використані в якості підкладок для гнучкої електроніки, оскільки виготовлення логічних елементів ведеться у вакуумі при підвищених температурах. Тому для підкладок використовують в основному неорганічні матеріали. Нижче наведено опис основних матеріалів підкладок, а в табл. 1.1 показані основні характеристики підкладкових матеріалів, що використовуються в основному для гнучкої електроніки.

1.1. Неорганічні надтонкі підкладки

Далі наведено список неорганічних матеріалів, що можна використовувати у вигляді підкладок для гнучкої електроніки.

Ситал являє собою склокерамічний матеріал, отриманий при термічній обробці (кристалізації) скла. За своїми властивостями ситал перевершує властивості вихідного скла: він має вищу механічну міцність, температуру розм'якшення та теплопровідність на 20-35% вище, ніж вихідне скло, а також кращі діелектричні властивості при високих частотах. Діелектрична проникність лужних ситалів нижча. На відміну від більшості високоміцних вогнетривких кристалічних матеріалів, ситал добре обробляється. Його можна кувати, витягувати, катати та відливати відцентровим способом. Основний недолік – ситал крихкий. Може використовуватися лише у вигляді дуже тонких шарів, що накладає деякі обмеження на функціональність гнучкого електронного виробу на підкладці цього типу [2].

Температура деформації ситалу вища, ніж температура початку розм'якшення вихідного скла. Ситал витримує різкі перепади температури в повітрі від -60 до 700 °C. Він має високий електричний опір, який дещо зменшується із збільшенням температури. За електричною міцністю ситали не поступаються кращим видам вакуумної кераміки, а за механічною міцністю в 2-3 рази міцніші за скло. Вони мають високу хімічну стійкість до кислот, не пористі,

дають низьку об'ємну усадку, є газонепроникним та мають низький вихід газу при високих температурах.

Фотоситал – склокристалічний матеріал, отриманий кристалізацією світлочутливого скла. Він складається з оксиду кремнію (75%), оксиду літію (11,5%), оксиду алюмінію (10%) та оксиду калію (3,5%), а також невеликих добавок нітрату срібла та діоксиду церію. Фотоситал стійкий до дії кислот, має високу механічну та термічну стійкість. Його теплопровідність у кілька разів перевищує теплопровідність ситалу, температурний коефіцієнт лінійного розширення становить $9 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ в діапазоні температур 20 – 120°C, питомий об'ємний опір при 150°C рівний $1 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ [2].

Основний недолік – крихкість. Може використовуватися лише у вигляді дуже тонких шарів, що накладає деякі обмеження на функціональність гнучкого електронного виробу на підкладці цього типу.

Кераміка. Матеріали, отримані спіканням порошків з одного або суміші оксидів при температурах, близьких до температури плавлення, але не нижче, називаються керамікою. Кераміка в основному використовується для товстоплівкових GPIS. Кераміка, основним компонентом якої є глинозем, стала найпоширенішою для підкладок. Виготовлений в оптимальних умовах, він має високі механічні, теплові та діелектричні властивості. Деякі відмінності між різними типами кераміки визначаються відсотком глинозему та структурою (Табл.1.2) [2].

Ще більші переваги в цьому плані має берилієва кераміка, теплопровідність якої вища, ніж у алюмінію, сплавів міді та деяких інших металів. Це стосується зразків чистого оксиду (BeO). Пористість та домішки значно знижують його теплопровідність. Наприклад, наявність 5% пор у оксиду алюмінію або оксиду кремнію знижує теплопровідність на 10, 34 та 50% відповідно. Кераміка з берилію має високі механічні, теплові, електричні властивості та хімічну стійкість (табл.1.2). Істотним недоліком є токсичність його парів та пилу.

Останнім часом нітрид алюмінію (AlN) став «популярним», також використовуються кварцові та сапфірові підкладки. Суттєвим недоліком керамічних підкладок являється значна шорсткість поверхні.

Основний недолік – крихкість. Може використовуватися лише у вигляді дуже тонких шарів, що накладає деякі обмеження на функціональність гнучкого електронного виробу на підкладці цього типу.

1.2. Органічні матеріали

Далі наведено список органічних матеріалів, що можна використовувати у вигляді підкладок для гнучкої електроніки.

Поліаміди – пластикові матеріали з високою міцністю і термостійкістю, високою хімічною стійкістю, стійкістю до стирання, хорошим антифрикційним і задовільними електричними властивостями. Здатний витримувати циклічні навантаження. Зберігають свої характеристики в широкому діапазоні температур. Витримують парову стерилізацію до 140 °C. Зберігають еластичність при низьких температурах [5].

Поліаміди є стійкими до дії спиртів, лугів, масел, бензину.

До недоліків поліамідів слід віднести високе водопоглинання та низьку світлостійкість.

Базові властивості поліамідів можна змінювати введенням в їх склад різних добавок: антипіренів (неармовані поліаміди – одні з небагатьох термопластів, які дозволяють успішно застосовувати екологічні чисті негалогенові антипірени), світло- і термостабілізаторів, модифікаторів ударної в'язкості, гідрофобних добавки.

Усі наведені вище характеристики дозволяють назвати поліаміди одним з найкращих типів підкладок для гнучкої електроніки, оскільки окрім добрих електричних якостей вони мають також, у порівнянні з вищеперерахованими матеріалами, відмінні механічні характеристики.

Полівінілхлорид (ПВХ, поліхлорвініл, вініл) – безбарвна, прозора пластмаса, термопластичний полімер вінілхлориду. Відрізняється хімічною стійкістю до лугів, мінеральних масел, багатьох кислот і розчинників. У чистому вигляді не підтримує горіння на повітрі, але вогнестійкість пластмас на його основі залежить від використаних добавок. Володіє малою морозостійкістю (-15 °C). Нагрівостійкість: +66 °C.

Недолік – має досить шорстку поверхню та малу нагрівостійкість, тому на його основі дуже проблематично виконувати складні тонкоплівкові структури [5].

Полікарбонати – група термопластів, поліефірів вугільної кислоти та двоатомних спиртів загальної формули (-O-R-O-CO-) n. Найбільше промислове значення мають ароматичні полікарбонати, в першу чергу, полікарбонат на основі Бісфенол А, завдяки доступності бісфенолу А, синтезованого конденсацією фенолу і ацетону [5].

Недолік – має досить шорстку поверхню та малу нагрівостійкість, тому на його основі дуже проблематично виконувати складні тонкоплівкові структури.

Таблиця 1.1 – Характеристики матеріалів підкладок, що застосовуються для тонкоплівкових ГПС

Параметр	Скло	Ситал		Кераміка		Поліамід	
	C41-1	C48-3	CT50-1	Полікор	Глазурована	Каптон-Н	ПМ-1
Клас шорсткості поверхні	14	14	13-14	12-14	14	-	-
Температурний коефіцієнт лінійного розширення . При	41±2	48±2	50±2	70-75	73-78	2,0	2,4

Продовження таблиці 1.1

температурі $T=20-300^{\circ}\text{C}(\alpha \cdot 10^{-7}),^{\circ}\text{C}^{-1}$							
Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/(м·К)	1	1,5	1,5	30-45	1,2-1,7	-	-
Температура розм'якшення, $^{\circ}\text{C}$	-	750	620	-	1900	400	400
Діелектрична проникність при $f=10^6$ Гц і $T=+20^{\circ}\text{C}$	7,5	3,2-8	5-8,5	10,5	13-16	3,5	3,5
Тангенс кута діелектричних втрат при $f=10^6$ Гц і $T=+20^{\circ}\text{C}$ $\text{tg}\delta \cdot 10^{-4}$	20	15	20	18	18	0,003	0,003
Об'ємний електричний опір при $T=+25^{\circ}\text{C}$,	10^{17}	10^{17}	-	-	-	276-	-

Продовження таблиці 1.1

Ом·см							
Електрична міцність, В/м·10 ⁶	40	-	40	-	50		160- 200

Таблиця 1.2 – Властивості матеріалів підкладок, що застосовуються як підкладки для гнучкої електроніки

Матеріал	90%Al ₂ O ₃	96%Al ₂ O ₃	99,6%Al O ₃	AlN	BeO	Квар ц	Сапфі р
Модуль пружності, МПа	324,07	324,07	344,75	291,6 6	319,9 3	72,40	344,75
Коефіцієнт термічного розширення, 10 ⁻⁶ /°C	6,70	7,11	6,30	4,30	8,00	0,72	7,74
Міцність на розрив, МПа	317,7	317,7	448,18	367,5 0	-	-	0,00
Коефіцієнт теплопровіднос ті, Вт/м·°C	16,74	25,10	37,40	170,0	250,0	0,75	25,00
Діелектрична стала (при частоті 1МГц)	9,40	9,90	10,00	8,80	7,00	3,80	0,00
Тангенс кута діелектричних втрат	-	0,0001- 0,0002	0,0001- 0,0002	-	0,000 1	0,000 2	0,002

1.3. Целюлоза та наноцелюлоза

Целюлоза, клітковина (фр. Cellulose від лат. Cellula – «клітина») – органічна сполука, вуглевод, полісахарид з формулою $(C_6H_{10}O_5)_n$. Молекули – нерозгалужені ланцюжки із залишків β -глюкози, з'єднаних глікозидними зв'язками β - (1 \rightarrow 4). Біла тверда речовина, нерозчинна у воді. Головна складова – частина клітинних оболонок всіх вищих рослин [7, 8].

Целюлоза – біла тверда, стійка речовина, не руйнується при нагріванні (до 200 °C). Є горючою речовиною, температура займання – 275 °C, температура самозаймання – 420 °C (бавовняна целюлоза). У 2016 році експериментально показано плавлення целюлози при 467 °C.

Нерозчинна у воді, слабких кислотах і більшості органічних розчинників. Однак завдяки великій кількості гідроксильних груп є гідрофільною (крайовий кут змочування складає 20 – 30 градусів).

Целюлоза не має смаку і запаху.

Целюлоза піддається біодеградації за участю багатьох мікроорганізмів.

Наноцелюлоза – це термін, що відноситься до наноструктурованих целюлоз. Це може бути як нанокристалічна целюлоза (CNC, або NCC) та нановолокниста целюлоза (CNF), так і мікрофібрільована целюлоза (MFC) або бактеріальна наноцелюлоза, яка відноситься до наноструктурованих целюлоз, що продукується бактеріями.

CNF – матеріал, що складається з нанорозмірних целюлозних волокон з високим співвідношенням сторін (відношення довжини до ширини). Типова ширина фібрили становить 5-20 нм з широким діапазоном довжин, зазвичай кілька мікрометрів. Він є псевдопластичною рідиною і проявляє тиксотропію, властивості деяких гелів або рідин, які є густими (грудкими) в нормальних умовах, але стають менш в'язкими при струшуванні. Під час зняття зусилля зсуву, гель відновлює велику частину свого первісного стану. Фібрили ізольовані від будь-якого джерела, що містить целюлозу, включаючи волокна на основі деревини (волокна целюлози), шляхом гомогенізації високого тиску, високої температури і високої швидкості стискання, подрібнення або мікрофлюїдації [11].

Наноцелюлозу можна також отримати з нативних волокон шляхом кислотного гідролізу, що призводить до утворення висококристалічних і жорстких наночастинок, які коротше (від 100 до 1000 нм), ніж нанوفібрили, отримані шляхом гомогенізації, мікрофлуоризації або шліфування. Отриманий матеріал відомий як нанокристал целюлози.

Термін “наноцелюлоза” (НЦ) була вперше використана Снайдером Турбако в кінці 1970-х років в лабораторіях ІТТ Rayonier в Уіппані, Нью-Джерсі, США, для опису продукту, отриманого у вигляді гелеподібного матеріалу, шляхом пропускання деревної целюлози через молочний гомогенізатор типу Gaulin при високих температурах і високому тиску з подальшим ударом викиду на тверду поверхню.

Термінологія вперше з'явилася публічно на початку 1980-х років, коли був випущений ряд патентів і публікацій для ІТТ Rayonier за новою наноцелюлозною композиції речовини. У більш пізній роботі Херрік Районьєре також опублікував роботу по створенню сухої порошкоподібної форми гелю. Rayonier є одним з провідних світових виробників очищеної целюлози, зацікавленої в створенні нових застосувань і нових ринках целюлози, а не для конкуренції з новими клієнтами. Таким чином, у міру видачі патентів Районьєр надав безкоштовну ліцензію тому, хто хотів би використовувати це нове застосування для целюлози. Районієр, як компанія, ніколи не прагнула до розширення. Швидше, Turbak et al. переслідували: 1) пошук нових застосувань для MFC. Вони включали використання MFC як загусник і в'язких речовин у продуктах харчування, косметики, паперовому освіту, текстилі, нетканих матеріалах і т. д.; 2) оцінювали набухання і інші методи для зниження енергетичних потреб для виробництва MFC / Nanocellulose. Після того, як ІТТ закрила лабораторію Rayonier Whippany в 1983-84 роках, Херрік працював над створенням сухої порошкової форми MFC в лабораторіях Rayonier в Шелтон, Вашингтон, США.

Виробництво. Наноцелюлоза, яка також називається целюлозними нановолокнами (CNF), мікрофібрільованою целюлозою (MFC) або

нанокристалами целюлози (CNC), може бути отримана з будь-якого вихідного матеріалу целюлози, але зазвичай використовується деревна маса [28].

Фібрили наноцелюлози можуть бути виділені з волокон на основі деревини з використанням механічних методів, які підвергають целюлози сильним механічним впливам, розриваючи великі деревні волокна в нановолокна. Для цієї мети можна використовувати гомогенізатори високого тиску, ультразвукові гомогенізатори, шліфувальні машини або мікрофлюїдизатори. Гомогенізатори використовуються для розшаровування клітинних стінок волокон і звільнення нанорозмірних фібрил. Цей процес споживає дуже велику кількість енергії, а значення більше 30 МВт-год/т.

Для вирішення цієї проблеми іноді застосовують ферментативно-механічну попередню обробку і введення заряджених груп, наприклад, шляхом карбоксіметилування або опосередкованого термоокиснення. Ці попередні стадії обробки можуть знизити споживання енергії до 1 МВт-год/т.

Наноси целюлози – стрижненеподібні висококристалічні частки (відносний показник кристалічності вище 75%) з прямокутним поперечним перерізом. Вони утворюються при кислотному гідролізі нативних целюлозних волокон, зазвичай використовують сірчану або соляну кислоту. Аморфні зрізи нативної целюлози гідролізуються, і після певного часу кристалічні секції можуть бути виділені з кислого розчину шляхом центрифугування і промивання. Їх розміри залежать від вихідного матеріалу на основі целюлози, а також від часу і температури гідролізу [29].

У квітні 2013 року на конференції Американського хімічного товариства були оголошені прориви у виробництві наноцелюлози.

У ICAR-Central Institute for Research on Cotton Technology, Mumbai, Індія, в 1973 році був розроблений новий хіміко-механічний процес виробництва наноцелюлози з бавовни. Щоб продемонструвати цю технологію промисловим користувачам, в цьому інституті в Мумбаї зараз працює експериментальний завод з виготовлення наноцелюлози з продуктивністю 10 кг в день. Цей об'єкт був відкритий в 2015 році.

Структура і властивості. Для вивчення структури і морфології типово висушеної наноцелюлози у світі були використані наступні методи: просвічувальна електронна мікроскопія (ТЕМ), скануюча електронна мікроскопія (SEM), атомно-силова мікроскопія (AFM), ширококутне рентгенівське розсіювання (WAXS), мала рентгенівська дифракція кута падіння, крос-поляризаційне обертання магнічного кута (CP/MAS), ядерний магнітний резонанс (ЯМР).

Комбінація мікроскопічних методів з аналізом зображення надає інформацію про ширини фібрил, визначити довжину фібрил складно через зачеплення і труднощі в ідентифікації обох кінців окремих нанофібрил. Крім того, суспензії наноклітинних ланцюгів можуть бути неоднорідними і можуть складатися з різних структурних компонентів, включаючи нанофібрили целюлози і пучки нанофібрил [31].

При дослідженні ферментованої целюлози, попередньо обробленої ферментами, в суспензії розмір і розподіли за розмірами було виявлено, що фібрили досить монодисперговані в основному з діаметром близько 5 нм, хоча іноді зустрічалися більш товсті пучки фібрил. Об'єднавши ультразвук з «попередньою обробкою окисленням», AFM виявив мікрофібрили целюлози з боковим розміром менше 1 нм. Нижній кінець розміру товщини становить близько 0,4 нм, що пов'язано з товщиною листа моношару целюлози.

Сукупну ширину можна визначити за допомогою CP/MAS NMR, розробленої Innventia AB, Швеція, який також був продемонстрований для роботи на наноцелюлозі (ферментативна попередня обробка). Середня ширина 17 нм була виміряна за допомогою ЯМР-методу, що збігається з показниками SEM і ТЕМ. Використовуючи ТЕМ, були зареєстровані значення 15 нм для наноцелюлози з карбоксіметилованої целюлози. Проте, більш тонкі фібрили також можуть існувати.

Wågberg et al. повідомили про ширину фібрили 5-15 нм для наноцелюлози з щільністю заряду близько 0,5 меКВ/г. Група Isogai повідомила про ширину фібрили 3-5 нм для термоокисненої целюлози з щільністю заряду 1,5 меКВ/г.

Хімічна обробка значно впливає на мікроструктуру наноцелюлози. Карбоксиметилування збільшує кількість заряджених груп на поверхнях фібрил, що полегшує вивільнення фібрил і призводить до зменшення і робить більш рівномірною ширину фібрили (5-15 нм) в порівнянні з ферментативною попередньою обробкою наноцелюлози, де ширина фібрил становить 10-30 нм,

Ступінь кристалічності і кристалічна структура. Наноцелюлоза має таку саму кристалічну структуру як і целюлоза і ступінь кристалічності не змінюється при отриманні наноцелюлози. Типові значення ступеня кристалічності становить близько 63% [34].

В'язкість. Ранні дослідники визнали унікальну реологію дисперсій наноцелюлози. Висока в'язкість при низьких концентраціях наноцелюлози робить наноцелюлозу дуже цікавою як некалорійний стабілізатор і гелеутворювач в харчових додатках, це основний напрямок, у якому рухались ранні дослідження.

Динамічні реологічні властивості досліджувалися дуже докладно і показали, що модуль зберігання і втрат не залежав від кутової частоти при всіх концентраціях наноцелюлози від 0,125 до 5,9%. Значення модуля накопичення особливо високі (104 Па при концентрації 3%) у порівнянні з результатами для нановолокон целюлози (102 Па при концентрації 3%). Існує також особлива сильна залежність від концентрації, так як модуль накопичення збільшується на 5 порядків, якщо концентрація збільшується з 0,125 до 5,9% [34].

Наноцелюлозні гелі також сильно стоншуються при зсуві (в'язкість втрачається під дією поперечних сил).

Механічні властивості. Кристалічна целюлоза володіє цікавими механічними властивостями для її використання. Її межа міцності на розтягнення становить близько 500 МПа, як і в алюмінію. Її жорсткість становить близько 140-220 ГПа, що можна порівняти з таким у кевлару і краще, ніж у скловолокон, які обидва використовуються в комерційних цілях як замінювачі пластмас. Плівки з наноцелюлози мають високу міцність (більше 200 МПа), високу жорсткість (близько 20 ГПа) і високу деформаційну здатність (12%). Співвідношення

міцність/вага в 8 разів більше, ніж у нержавіючої сталі. Волокна з наноцелюлози мають високу міцність (до 1,57 ГПа) і жорсткість (до 86 ГПа) [28].

Бар'єрні властивості. У напівкристалічних полімерах кристалічні області вважаються газонепроникними. Через відносно високу кристалічність в поєднанні із здатністю нановолокон утворювати щільну мережу, яка утримується сильними межфібрилярними зв'язками (висока щільність когезійної енергії), було висловлено припущення, що наноцелюлоза може виступати в якості бар'єрного матеріалу. Хоча кількість зареєстрованих значень проникності для кисню обмежена, повідомлення характеризують високі бар'єрні властивості плівок наноцелюлози до кисню. В одному з досліджень повідомлялося про проникності для кисню 0,0006 (см³/мкм)/г. для 5 мкм наноклітинної плівки при 23 °C і 0% відносної вологості. У відповідному дослідженні повідомлялося про більш ніж 700-кратне зниження проникності кисню полілактоїдної (PLA) плівки при додаванні наноцелюлозного шару до поверхні PLA.

Нещодавно було досліджено вплив щільності плівки наноцелюлози і пористості на проникність плівки. Деякі автори повідомили про значну пористість в плівках з наноцелюлози, що, мабуть, суперечить високим бар'єрним властивостям кисню, тоді як Aulin et al. вимірювали щільність плівки наноцелюлози, близьку до щільності кристалічної целюлози (кристалічна структура целюлози ІВ, 1,63 г/см³), що вказує на дуже щільну плівку з пористістю, близькою до нуля.

Зміна функціональності поверхні наночастинки целюлози також може впливати на проникність плівок наноцелюлози. Плівки, що складаються з негативно заряджених нановолокон целюлози можуть ефективно знижувати проникнення негативно заряджених іонів, залишаючи нейтральні іони практично непорушними. Було виявлено, що позитивно заряджені іони накопичуються в мембрані.

Піни. Наноцелюлозу можна також використовувати для отримання аерогелей/пінопластів, рівномірно або в композиційних матеріалах. Наноцелюлозні піни вивчаються для пакувальних застосувань, щоб замінити

пінополістирол. *Svagan et al.* показали, що наноцелюлоза має здатність посилювати крохмальні піни з використанням методу сублімації сушіння. Перевага використання наноцелюлози замість деревних волокон целюлози полягає в тому, що нанофібрили можуть посилювати тонкі клітини в крохмальній піні. Крім того, можна приготувати чисті наноцелюлозні аерогелі, застосовуючи різні сублімаційні і сверхкритичні CO₂.

Аерогелі і піни можна використовувати в якості пористих шаблонів. Тверді надвисокі пористості структури отримані з суспензій нанофібрил целюлози вивчалися *Sehaqui et al.*

Широкий спектр механічних властивостей, включаючи стиснення, було отримано шляхом контролю щільності і взаємодії нанофібрил в пінопласті. Наноси целюлози також можуть бути виготовлені для гелю у воді при низькій потужності ультразвуку, що призводить до утворення аерогелей з найвищою зареєстрованої площею поверхні ($> 600\text{m}^2/\text{г}$) і найменшою усадкою під час сушіння (6,5%). В іншому дослідженні, проведеному *Aulin et al.*, було продемонстровано утворення структурованих пористих аерогелей наноцелюлози шляхом сублімації сушіння. Щільність і текстуру поверхні аерогелей налаштовували шляхом вибору концентрації дисперсій наноцелюлози перед ліофілізацією. Хімічне осадження з парової фази фторсилана використовувалося для рівномірного покриття аерогелем. Автори продемонстрували, що можна змінити поведінку поверхонь целюлози між супер-змочуванням і супергідрофобністю, використовуючи різні масштаби шорсткості і пористості, створені методом сублімації зміщення, і зміни концентрації дисперсії наноцелюлози. Однак структуровані пористі целюлозні піни можуть бути також отримані з використанням методу ліофілізації на целюлозі, що генерується штамами бактерій *Gluconobacter*, які біосинтезують відкриті пористі мережі целюлозних волокон з відносно великою кількістю нанофібрил, диспергованих всередині.

Olsson et al. продемонстрували, що ці мережі можуть бути додатково просочені попередниками гідроксиду металу/оксиду, які можуть бути легко

трансформовані в щеплені магнітні наночастинки вздовж нановолокон целюлози. Повідомлялося, що магнітна целюлозна піна може забезпечити ряд нових застосувань наноцелюлозі, і були отримані перші магнітні супер-губки з дистанційним управлінням, що поглинають 1 г води в зразку аерогелю целюлози 60 мг. Примітно, що ці високопористі піни ($> 98\%$ повітря) можуть бути стиснуті в сильні магнітні нанопокриття, які можуть бути використані в якості функціональних мембран для різного застосування.

Зміна поверхні. В даний час поверхнева модифікація наноцелюлози отримує велику увагу. Наноцелюлоза має високу концентрацію гідроксильних груп на поверхні, яку можна піддавати різним хімічним реакціям. Однак водневий зв'язок суттєво впливає на реакційну здатність поверхневих гідроксильних груп. Крім того, домішки на поверхні наноцелюлози, такі як фрагменти глюкозидів і лігнінів, необхідно видалити перед модифікацією поверхні, щоб отримати прийнятну відтворюваність між різними партіями.

Питання безпеки. Нещодавно були оцінені аспекти здоров'я, безпеки та навколишнього середовища відносно наноцелюлози. Обробка наноцелюлози не викликає значного викиду дрібних частинок під час фрикційного шліфування або розпилювальної сушки. Ніяких доказів запальних ефектів або цитотоксичності на макрофагах після впливу наноцелюлози у мишей або людини не спостерігається. Результати досліджень токсичності показують, що наноцелюлоза не є цитотоксичною і не здійснює ніякого впливу на ссавців. Крім того, наноцелюлоза не надто токсична навіть у значущих концентраціях.

Папір і картон. Існує потенціал застосування наноцелюлози в області виробництва паперу і картону. Очікується, що наноцелюлози поліпшать міцність волоконно-оптичного зв'язку і, отже, підвищать якість паперових матеріалів. Наноцелюлоза може бути корисна в якості бар'єру в папері із захистом від жиру і як добавка для підвищення стійкості до вологи в товарному типі паперу і картону. Було показано, що застосування CNF в якості матеріалу покриття на поверхні паперу і картону покращує бар'єрні властивості, особливо опір до проникання

повітря. Він також покращує структурні властивості картону (більш гладка поверхня).

Наноцелюлозу можна використовувати для виготовлення гнучкого і оптично прозорого паперу. Такий папір є привабливим субстратом для електронних пристроїв, оскільки він придатний для повторного використання, сумісний з біологічними об'єктами і легко деградує при утилізації.

Як описано вище, властивості наноцелюлози роблять її цікавим матеріалом для армування пластмас. Повідомляється, що наноцелюлоза покращує механічні властивості, наприклад, термореактивних смол, матриць на основі крохмалю, соєвого білка, каучукового латексу, тощо. Композитні добавки можуть використовуватися в якості покриттів і плівок, фарб, пінопластів, упаковки.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ СЕНСОРІВ МЕХАНІЧНИХ ПОЛІВ

Для дослідження гнучких резистивних сенсорів необхідно спроектувати стенд, який дозволить проводити дослідження різних сенсорів у однакових умовах та дасть повторюваність результатів. Для цього спочатку потрібно визначитися, що таке тензоефект та від чого він залежить.

2.1. Фізична суть тензоефекту

Тензоефект – це властивість матеріалу змінювати свій опір під час деформації. Вважається, що опір провідника або напівпровідника залежить (при постійному об'ємі) від його довжини.

Основа методу вимірювання деформації тензодатчиком полягає в тому, що деформація змінює електричний опір останнього. Проаналізувавши це явище з точки зору процесів розсіювання електронів, можливі два випадки: масивний монокристалічний або плівковий високодисперсний тензодатчик. У першому випадку основний внесок в ефект деформації дає зміна середньої довжини вільного пробігу електронів внаслідок деформації фононного спектра та зміни геометричних розмірів резистора [1]. Якщо довжина резистора l , площа перерізу $S = a \cdot d$ (a – ширина, d – товщина), то електричний опір резистора пов'язаний з його коефіцієнтом опору (ρ)

$$R = \rho \frac{l}{a \cdot d} \quad (1.1)$$

Узявши диференціал від логарифма лівої і правої частин, отримуємо

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{da}{a} - \frac{dd}{d} \quad (1.2)$$

або після винесення за дужки деформації $\frac{dl}{l}$ отримуємо

$$\frac{dR}{r} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \cdot \frac{dl}{l} \quad (1.3),$$

де

$$\mu = -\frac{\frac{da}{a}}{\frac{dl}{l}} = -\frac{d\frac{l}{l}}{d\frac{a}{a}} \quad (1.4)$$

– коефіцієнт Пуассона для матеріалу тензорезистора.

Якщо тензометр знаходиться у вільному стані, ми отримуємо

$$K = \frac{dR}{Rd\varepsilon} = m + 1 + 2\mu \quad (1.5),$$

де K і m – коефіцієнт деформаційної чутливості, виражений відповідно в R або ρ .

Слід зазначити, що в практичній та теоретичній тензометрії прийняті різні позначення коефіцієнтів K , m та деякі інші параметри. Зокрема, в теорії деформаційної чутливості існує два типи поздовжніх коефіцієнтів γ^l та поперечної γ^t тензочутливості; якщо ці величини виразити через питомий опір, то позначають γ^{tp} і γ^{lp} .

Слід мати на увазі, що в теорії тензоефекту вивчаються вільні тензорезистори, тому розглядають деформації ε^l і ε^t (у практичній тензометрії деформація конструкції та чутливого елемента розглядаються окремо).

Ситуація змінилася під час переходу до виготовлення чутливих елементів у вигляді тонкоплівкової системи, оскільки деякі параметри стали менш необхідними (наприклад, у швидкості передачі Купера). У випадку, коли до конструкції підключений масивний тензорезистор, коефіцієнт можна записати як:

$$\frac{dR}{R} = K_{\text{прт}} \frac{dl}{l} \quad (1.5),$$

де $K_{\text{прт}} = 1 + 2\mu + m$ – коефіцієнт перетворення деформації конструкції (ϵ) за допомогою тензорезистора. Між коефіцієнтами K і $K_{\text{прт}}$ існує зв'язок

$$K = K_{\text{пер.ч}} \cdot K_{\text{прт}} \quad (1.6).$$

$K = K_{\text{прт}}$ лише за умови, що коефіцієнт передачі деформації ϵ зв'язуючою до чутливого елемента $K_{\text{пер.ч}}$.

$$K_{\text{пер.ч}} = \epsilon_{\text{ч}} / \epsilon \quad (1.7),$$

де $\epsilon_{\text{ч}}$ – справжня деформація чутливого елемента дорівнює одиниці. Якщо чутливий елемент виконаний у вигляді полікристалічної плівкової системи (одно- або багат шарової), то зміна СВДП, як і у випадку з ТКО, відбувається не тільки внаслідок деформаційних змін спектра фононів, але і коефіцієнтів r , p , а у випадку багат шарової плівки – Q .

2.2. Методика вимірювання тензоефекту

Будемо користуватися наступною методикою вимірювання деформації на згин. Для визначення коефіцієнтів поздовжньої та поперечної тензочутливості можна скористатись наступним співвідношенням:

$$\frac{\Delta R}{Rn} = \gamma_l \epsilon_t \quad (1.8)$$

та

$$\frac{\Delta R}{Rn} = \gamma_t \epsilon_l \quad (1.9).$$

Звідси можна побудувати залежність зміни опору зразка в процесі деформації в координатах $\frac{\Delta R}{Rn}$ від ϵ , то тангенс кута нахилу цієї залежності дасть величину γ_i і γ_t .

Необхідно відмітити, що деформаційна залежність має лінійний характер лише в певних інтервалах деформації. Тому при визначенні коефіцієнтів тензочутливості необхідно розглядати лінійні ділянки або проводити усереднення кривої. Більш складною проблемою в даному випадку є визначення величини деформації.

Лінійне видовження зразка та його обрахунок. Зміна опору тензорезистора лінійно пов'язана з видовженням вимірюваного зразка.

Оскільки

$$\frac{dR}{R} = K_{\text{прт}} \cdot \frac{dL}{L} \quad (1.10),$$

то для визначення коефіцієнту перерахунку нам необхідно навчитися рахувати dL .

З теорії сопромату відомо, що під час згину пластини лінійне видовження середньої лінії пластини не змінюється, а видовження зовнішньої і внутрішньої поверхонь збільшується і зменшується відповідно.

Лінійне видовження поверхні зразка при згині прямо пропорційне зміні радіусу кола, яке можна доторкнути до зразка.

З цього маємо:

$$R = \frac{h}{2} + C^2 \cdot 8h \quad (1.11),$$

де h – висота вигину центра зразка відносно його країв, а C – довжина зразка.

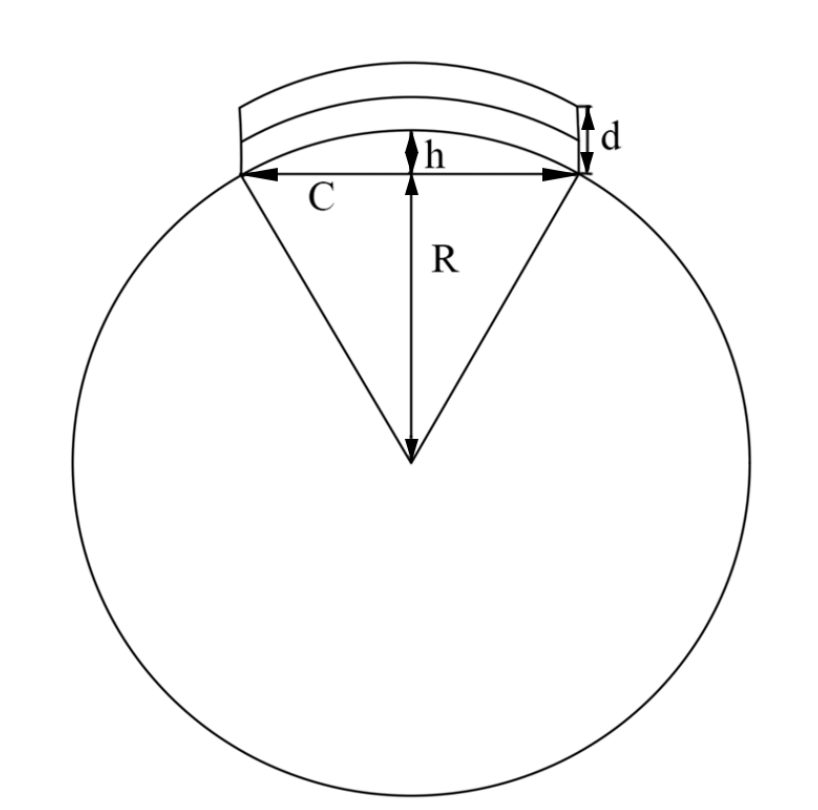


Рисунок 2.1 – Принцип вимірювання лінійного видовження зразка

З цієї формули випливає:

$$L_0 = 2\pi \cdot (R + 0,5d) \quad (1.12),$$

$$L_1 = 2\pi \cdot (R + d) \quad (1.13),$$

$$dL = (L - L_0) / L_0 \quad (1.14).$$

Отже, лінійне видовження поверхні зразка можна обчислити за наступною формулою:

$$dL = \frac{1,5d}{\left(\frac{h}{2} + c^2 \cdot 8h\right) + 0,5d} \quad (1.15).$$

2.3. Висновки та вимоги до вимірювального стенду

Отже, для того, щоб забезпечити повторюваність результатів вимірювання необхідно поставити такі вимоги для установки, на якій будуть проводитися вимірювання:

- можливість вигинати зразок на певний радіус вигину однаково для кожної ітерації;

- можливість дуже точно міняти вигин зразка;

- наявність шкали для контролю величини вигину;

- швидка заміна зразків;

- однаковість пружних деформаційних підкладок, на які кріпляться сенсори.

3. РОЗРОБКА СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ГНУЧКИХ СЕНСОРІВ ТЕНЗОЕФЕКТУ

3.1. Будова та опис механічної частини стенду

Для того, щоб вимірювати зміну опору в залежності від величини згину тестового зразку було спроектовано та побудовано вимірювальний стенд. На Рис. 1 та Рис. 2 показано вид спереду та вид з боку відповідно.

Ширина точок опори для зразку (С) 33.75 мм.

Для вимірювання вигину центра тестової пластини відносно точок опори використано мікрометричну індикаторну головку часового типу з ціною поділки 0.01 мм.

Для згину зразка використовується мікрометричний гвинт.

Діапазон можливих значень згину для стенду – від 0 до 3.5 мм.

На рис. 3.1 показано реалізацію згину тестової пластини та контролю величини згину за допомогою мікрометричної головки.

Деформаційні підкладки для вимірювань та кріплення сенсорів на підкладки були наступними. У якості пружних деформаційних підкладок використано пластини з високолегованої сталі У8А товщиною 0.7 мм.

Нижче наведені параметри матеріалу:

Питома вага: 7839 кг/м³

Термообробка: Загартування 780°C, масло, Відпустка 400°C.

Твердість матеріалу: НВ 10 -1 = 187 МПа

Температура критичних точок: Ас1 = 720, Аг1 = 700, Мн = 245

Температура кування, °С: початку 1180, кінця 800. Перетини до 100 мм охолоджуються на повітрі, 101-300 мм в ямі.

Різанням: при НВ 187-227, $\sigma_b = 620$ МПа, До ν тв. спл = 1,2 і К_в б.ст = 1,1

Зварюваність матеріалу: не застосовується для зварних конструкцій.

Схильність до відпускнуї крихкості: не схильна.

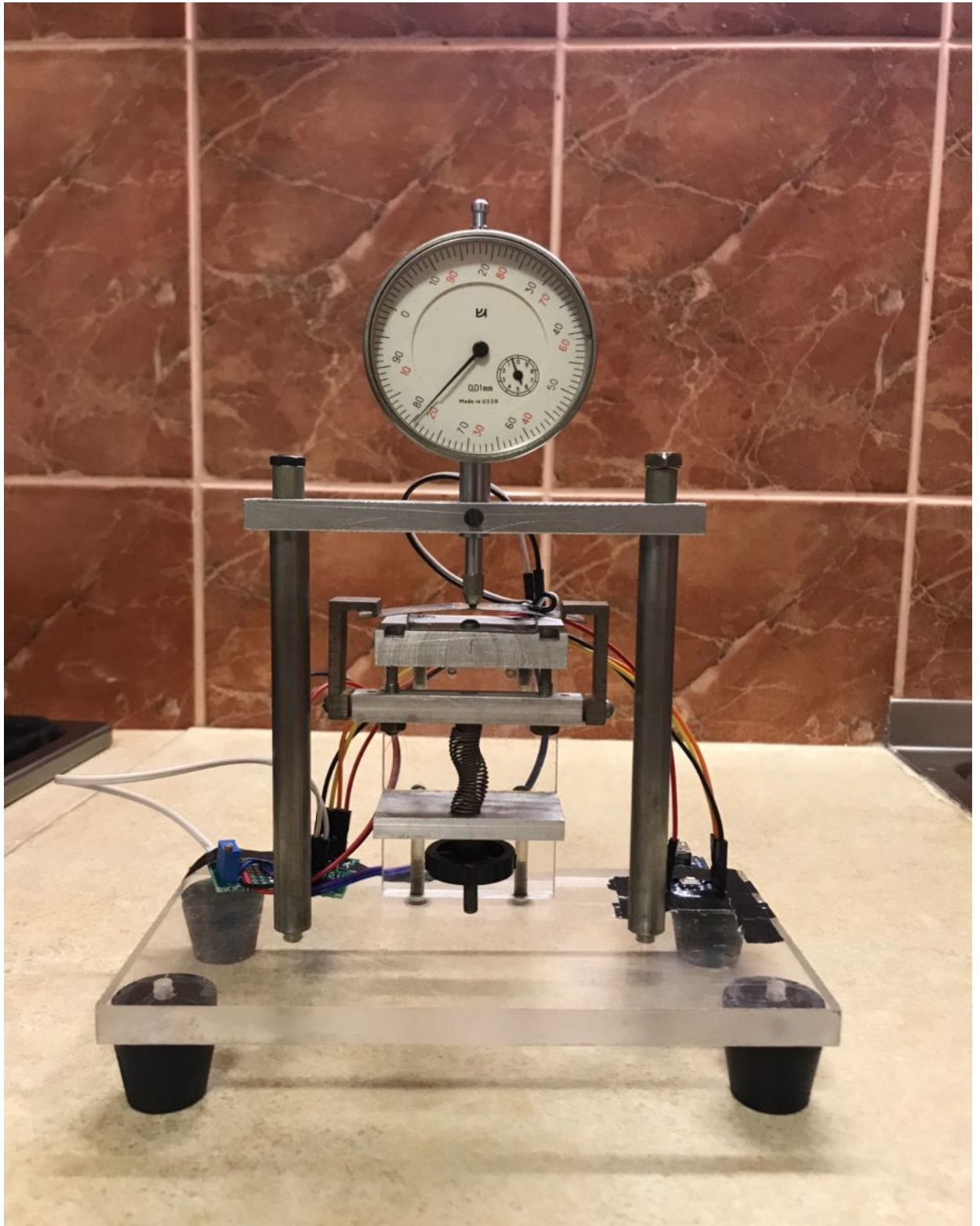


Рисунок 3.1 – Стенд для вимірювання залежності опору від згину зразка
(фронтальний вид)



Рисунок 3.2 – Стенд для вимірювання залежності опору від згину зразка
(вид з боку)

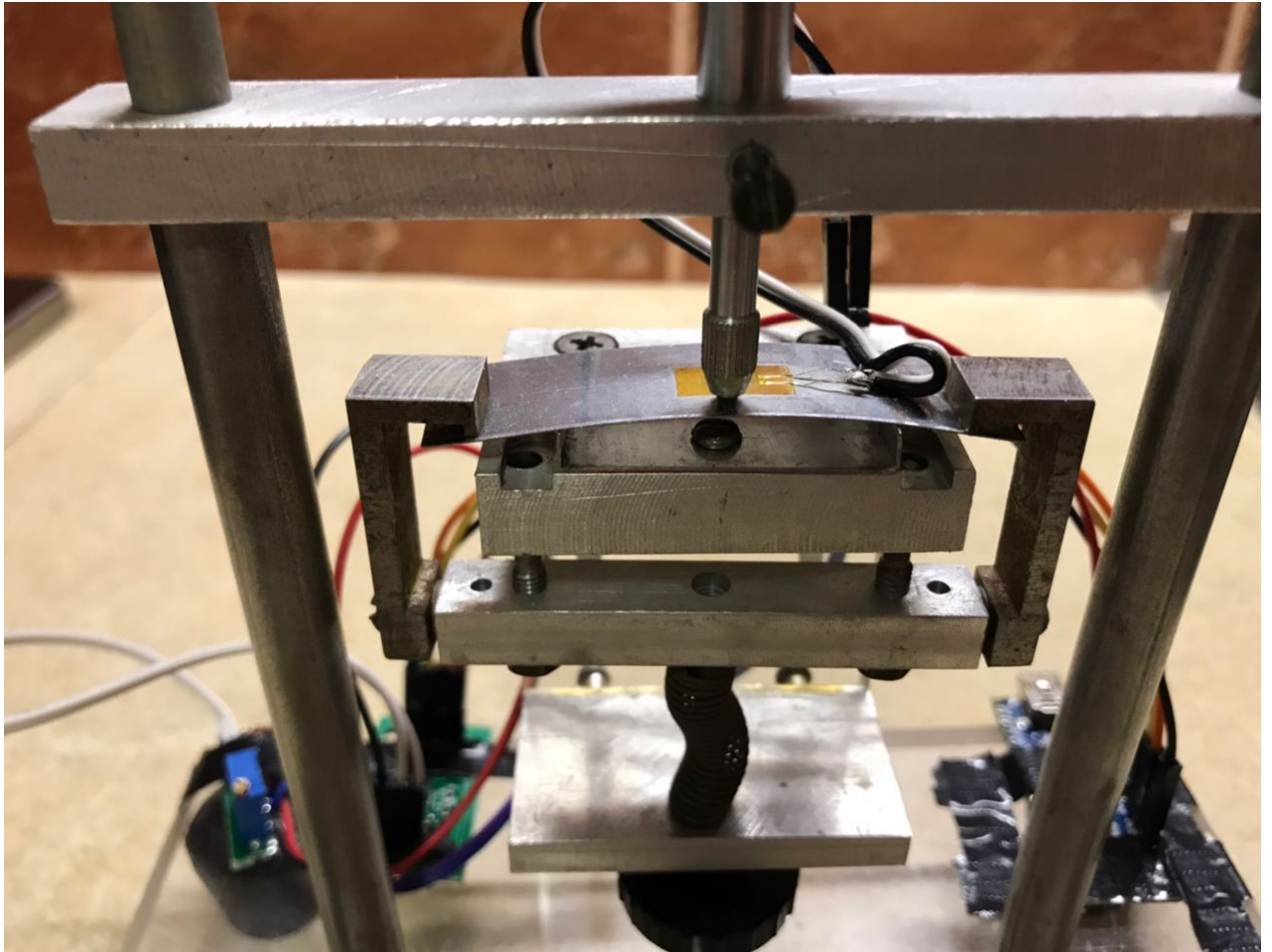


Рисунок 3.3 – Реалізація згину тестової пластини та контролю величини згину

Сенсори на підкладки кріпляться за допомогою спеціалізованого непружного клею на основі циакріну. Оскільки наноцелюлоза не витримує температури, що є вищими за 100 °С, не можливо використовувати пайку для кріплення омичних контактів до нікелевого шару сенсора.

Вирішенням цієї проблеми стало використання струмопровідного клею на основі часток срібла.

Параметри клею:

- провідний агент: срібний порошок 80-90%
- розмір частинок срібла: 2 нм
- тривала робоча температура: нижче 70 °С
- розріджувач: етанол (пропорції - 1: 0,7-0,8)



Рисунок 3.4 – Деформаційна пластина з сенсором

На рис.3.4 нижче наведено мікрофотографію деформаційної пластини з приклеєним на неї сенсором на основі наноцелюлози та реалізованими омичними контактами за допомогою струмопровідного клею. Стенд повністю відповідає поставленим вимогам та повністю працездатний.

3.2. Будова та опис електричної частини стенду

Для проведення вимірювань зміни опору порядку 1 мкОм (саме такі очікувані зміни опору) не можна використовувати омметри, тому що вони просто відсутні у вільному доступі.

Тому для вимірювання зміни опору тензорезистора було обрано непрямий спосіб вимірювань за допомогою моста Уїтстона. Цей міст використовується для знаходження невідомого опору дуже точно, порівнюючи його з відомим значенням опорів.

Для цього мосту врівноважений стан напруги в точках С і D повинні бути однаковими. Отже, через гальванометр не протікає струм. Для отримання збалансованого стану один з резисторів повинен бути змінним.

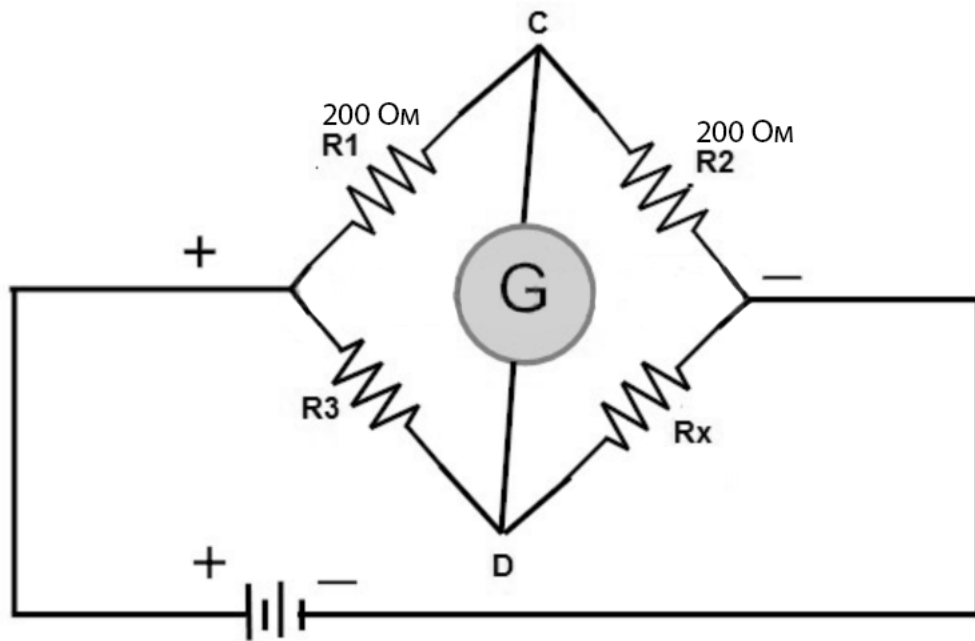


Рисунок 3.5 – Вимірювальний міст Уїтстона

З рис.3.5 випливає, що напруга в точці D виражається рівністю:

$$D = V \times RX / (R3 + RX),$$

напруга в точці C:

$$C = V \times R2 / (R1 + R2),$$

напруга (V) на гальванометрі між C і D становить:

$$VCD = V \times RX / (R3 + RX) - V \times R2 / (R1 + R2),$$

з цього випливає вираз для опору тензорезистора:

$$RX = (R1 * R3 * VCD + R2 * R3 * VCD + R2 * R3 * V) / (-R1 * VCD - R2 * VCD + R1 * V)$$

Отже, за допомогою моста Уїтстона ми можемо виміряти зміну опору зразка через вимірювання зсуву напруги на мості.

Для вимірювання зсуву напруги на мості Уїтстона було обрано АЦП ХН711 та мікроконтролер АТmega328р для обробки даних з АЦП.

Електричну принципову схему вимірювальної установки наведено на рис. 3.6.

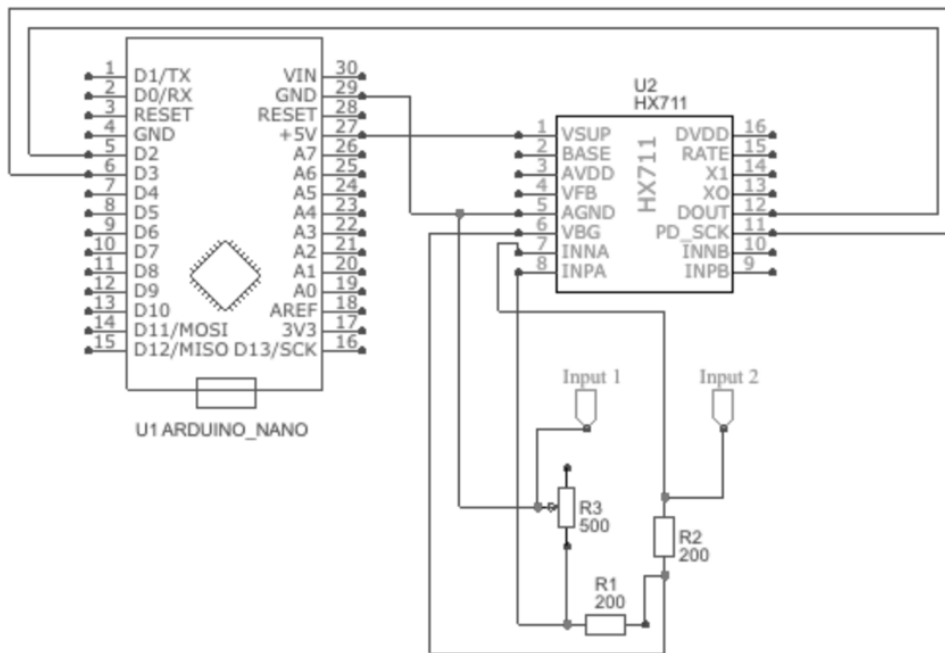


Рисунок 3.6 – Електрична принципова схема стенду

3.3. Лістинг програмного забезпечення для проведення вимірювань

Далі наведено лістинг програмного забезпечення для проведення вимірювань.

```
#include "HX711.h"

#define DOUT 3
#define CLK 2
#define ADCbit 5
HX711 ADC_1;

void setup() {
  ADC_1.begin(DOUT, CLK);
  Serial.begin(115200);
}

void loop()
{
  ADC_1.set_gain(128);
```

```

long avg = ADC_1.get_value(1);
Serial.println(avg);
delay(20000);
}

```

Змінюючи параметр “delay()” можна змінювати частоту проведення вимірювань.

3.4. Методика проведення вимірювань за допомогою стенду

Під час проведення вимірювань слід дотримуватися такої послідовності дій:

1. Закріпити зразок на столику стенду.
2. Підключити контакти зразка до входу стенду.
3. Підключити стенд до комп'ютера.
4. Відкрити на комп'ютері монітор послідовного порту.
5. Обнулити лімб мікрометричної головки
6. За допомогою резистора R3 максимально обнулити показники у вікні монітору послідовного порту.
7. Від'єднати стенд від комп'ютера.
8. Від'єднати зразок від входу стенду.
9. За допомогою омметра виміряти опір резистора R3.
10. Записати опір резистора R3 у таблицю.
11. Під'єднати зразок до входу стенду та стенд до комп'ютера.
12. Проводити вимірювання обертаючи мікрометричний гвинт на стенді тим самим змінюючи величину вигину деформаційної пластини з зразком.

В роботі проводилось вимірювання характеристик існуючих ринкових тензорезисторів за допомогою стенду та оцінка його працездатності.

Вимірюємо характеристику залежності зсуву напруги на вимірювальному мосту від величини вигину середньої точки зразку у відношенні до крайніх точок промислового сенсора групи компаній “Веда” для того, щоб оцінити

працездатність та повторюваність результатів, які забезпечує розроблений стенд. Побудуємо графіки тестових досліджень (рис.3.7, 3.8, 3.9).

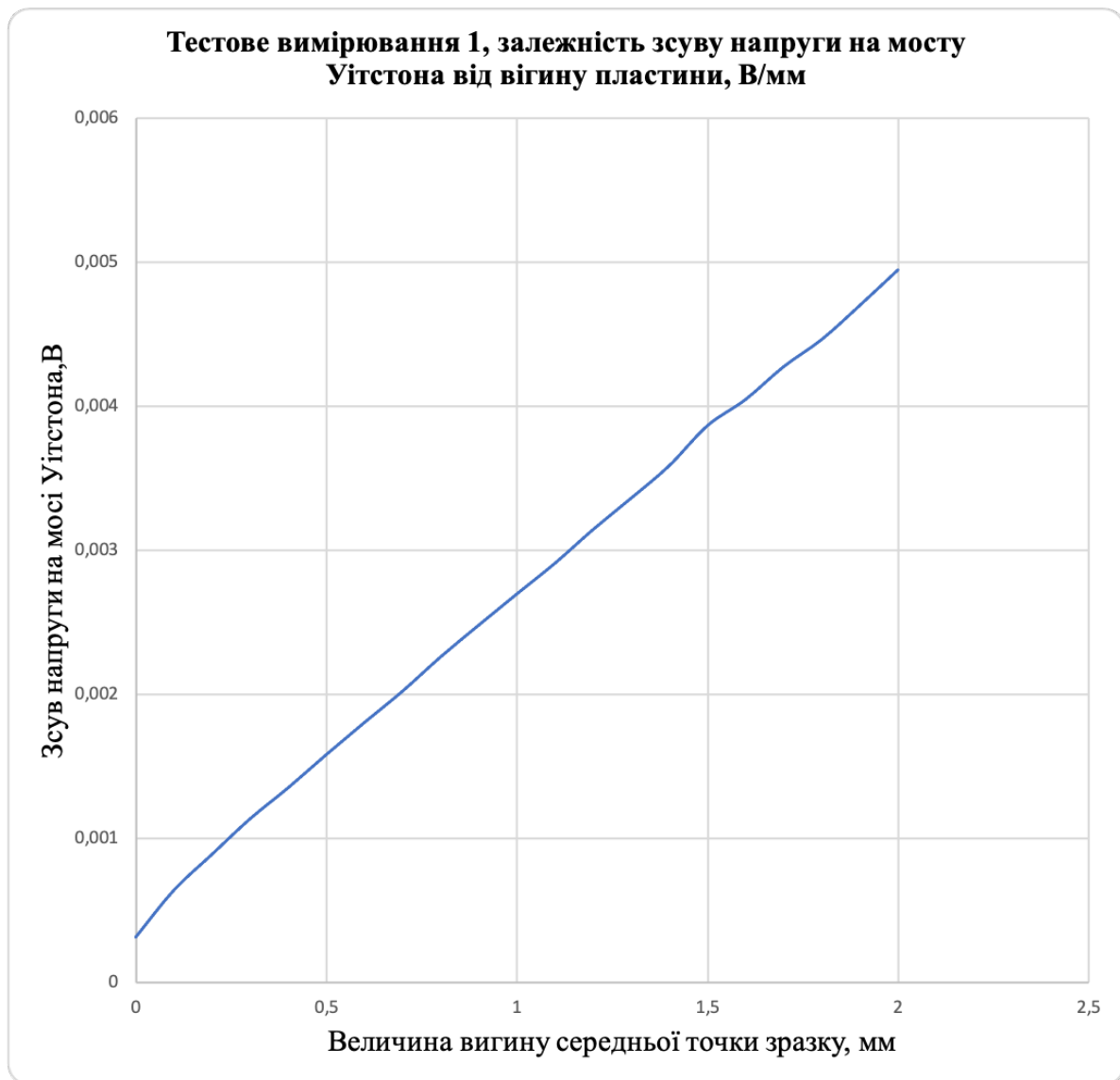


Рисунок 3.7 – Графік залежності зсуву напруги на мості Уїтстона від величини вигину тестової пластини (перше тестове вимірювання)

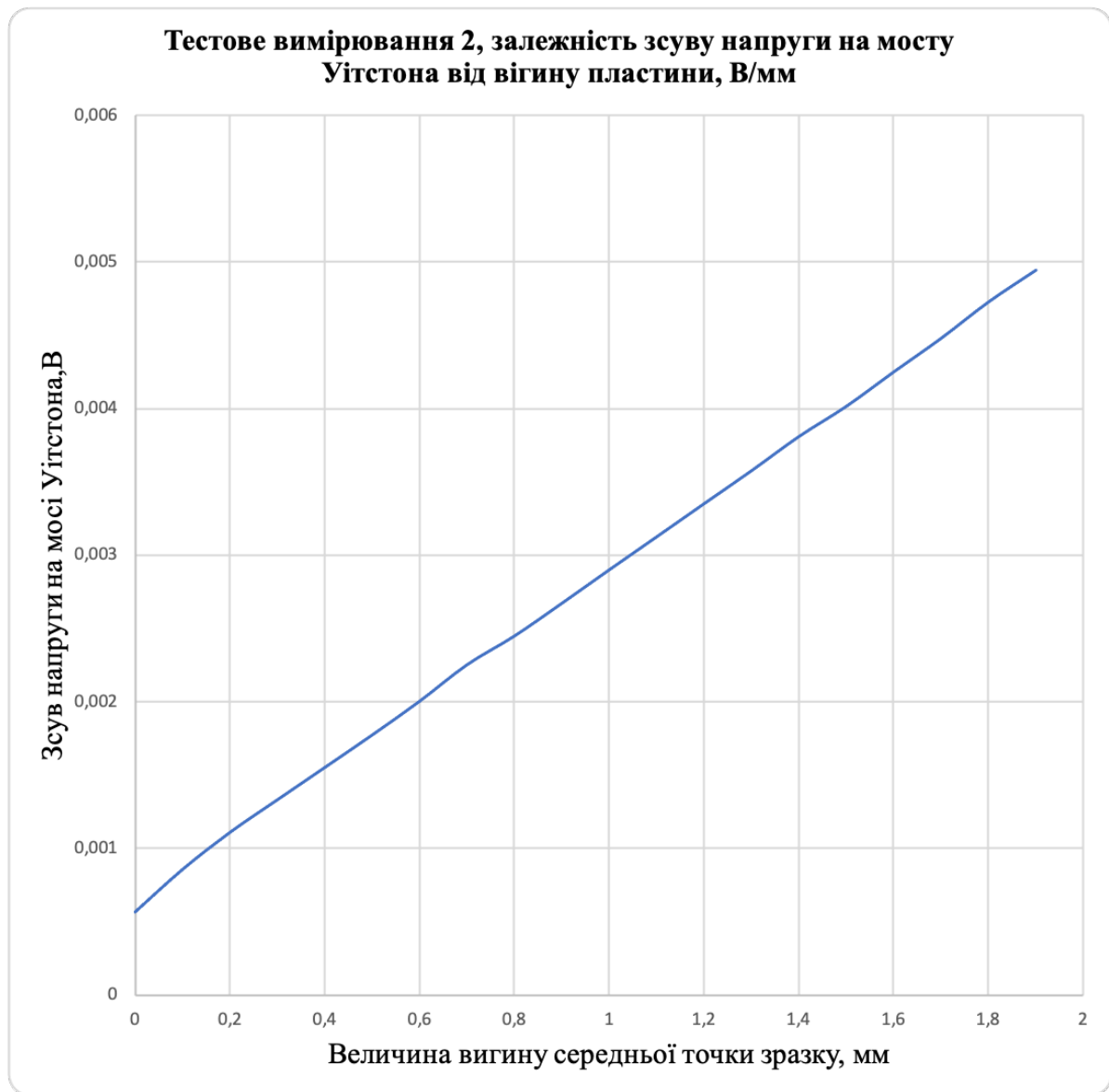


Рисунок 3.8 – Графік залежності зсуву напруги на мості Уїтстона від величини вигину тестової пластини (друге тестове вимірювання)

Проаналізувавши дані графіки можна зробити висновок, що стенд працює справно та забезпечує нам повторюваність результатів вимірювань, отже можна переходити до дослідження сенсорів на nanoцелюлозних підкладках.

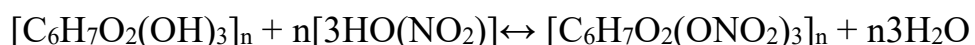
4. ДОСЛІДЖЕННЯ ГНУЧКИХ РЕЗИСТИВНИХ СЕНСОРІВ НА ОСНОВІ ПЛІВОК НАНОЦЕЛЮЛОЗИ

4.1. Технологічний процес синтезу наноцелюлози

У якості підкладки для сенсорів було синтезовано наноцелюлозу. Опис технологічного процесу наведено нижче. Стадії процесу:

1. Підготовка целюлози до нітрації;
2. Приготування кислотної суміші;
3. Нітрація целюлози;
4. Віджимання кислоти і промивка холодною водою;
5. Стабілізація нітроцелюлози;
6. Подрібнення нітроцелюлози;
7. Кінцева стабілізація;
8. Очищення нітроцелюлози;
9. Зниження в'язкості колоксиліну;
10. Зневоднення нітроцелюлози.

Хімізм процесу. Целюлоза при обробці азотною кислотою, сумішами азотної кислоти з сірчаною чи фосфорною кислотами утворює азотнокислі ефіри. Процес утворення азотнокислих ефірів виражається рівнянням:



Реакція зворотна, тому до складу нітруючої суміші вводять речовини, здатні зв'язувати воду (сірчана кислота).

У залежності від складу нітруючої суміші і умов нітрування (час, температура, кількість води) можуть бути одержані продукти з різним ступенем заміщення і ступеню полімеризації.

Реакція нітрації проходить досить швидко, однак зі збільшенням вмісту води у суміші збільшується тривалість процесу. З підвищенням температури швидкість реакції етерифікації збільшується, але ступінь заміщення її не змінюється, тільки збільшується деструкція целюлози. При нітрування целюлози,

крім основної реакції, проходять також реакції окислення, гідролізу целюлози і утворення сірчаноокислих ефірів целюлози.

Колоксилін має вміст азоту 11,5-12,0%. Розчиняється у суміші спирту і ефіру та в ацетоні. Склад нітруючої суміші, що використовувалася при виробництві колоксиліну: HNO_3 -22,45%; H_2SO_4 -59,55%; H_2O -17,94%.

Нижче у табл. 4.1 та 4.2 наведено інформацію по завантаженню сировини на операцію та норми технологічного режиму синтезу наноцелюлози.

Таблиця 4.1 – Завантаження сировини на операцію синтезу наноцелюлози

№ п/п	Технологічна операція	Найменування сировини	Молекулярна маса	Масова частка речовини, %	Завантаження, кг, л.
1.	Нітрація целюлози	Целюлоза Азотна кислота Сірчана кислота	800÷900 63,02 98	99,8 65,3 90,05	17кг 229,6кг(164 л) 449,7кг(247,1л)
2.	Стабілізація	Нітроцелюлоза Сода кальцинована Вода	106 18	30 99,8	76,6кг 0,034кг 76,4 л
3.	Зневоднення	Нітроцелюлоза Етиловий спирт	46	30 96	76,6 кг 80 л

Таблиця 4.2 – Норми технологічного режиму синтезу наноцелюлози

№ п/п	Найменування операції та реагентів	Маса, кг	Тривалість , хв	Температура , °C
1.	Приготування кислотної суміші Азотна кислота Сірчана кислота	229,6 449,7	5	28 - 30
2.	Нітрація целюлози у нітраторі Целюлоза Азотна кислота Сірчана кислота Вода	17 229,6 449,7	40	28 - 30
3.	Спуск маси в центрифугу		5	
5.	Відокремлення нітруючої суміші від целюлози		10	
6.	Промивка нітроцелюлози холодною водою	800	80	16 - 22
7.	Стабілізація нітроцелюлози: Промивання гарячою водою Варіння нітроцелюлози з содою Промивання нітроцелюлози гарячою водою	1000 153 600	100 180 60	90 - 95 90 - 95
8.	Подрібнення нітроцелюлози	383	120	20

Продовження таблиці 4.2

9	Кінцева стабілізація	600	60	90 - 95
	нітроцелюлози	400	40	16 - 22
	Гаряче промивання			
	Холодне промивання			
10.	Сортування нітроцелюлози	575	40	10÷20
11.	Зниження в'язкості нітроцелюлози	115	120	110
12.	Зневоднення целюлози	156,6	40	20

Фізичні параметри одержаних в роботі наноцелюлозних плівок наведені в табл.4.3, звідки видно, що одержані зразки характеризуються значною гнучкістю та водночас міцністю і можуть бути використані у якості підкладок для створення електронних приладів (в даній роботі для сенсорів механічних полів).

Таблиця 4.3 – Характеристики кінцевої продукції (наноцелюлозних плівок)

1.	Об'ємна концентрація окису азоту, мл NO/г	190-196
2.	Відносна в'язкість, $^{\circ}\text{Э}$	1,9-2,2 (ВВ) 1,03-1,1 (ВнВ)
3.	Розчинність в етиловому спирті, не більше, %, у комбінованому розчинникові, не менше, %	8 99,8
4.	Вміст золи, %, не більше	0,15
7.	Щільність, г/см ³	1,1 – 1,5
8.	Товщина, мкм	20 – 70
9.	Міцність на розрив, МПа	не менше 70
10.	Модуль Юнга, ГПа	не менше 6,0
11.	Прозорість, %	не менше 60

4.2. Технологічний маршрут виготовлення сенсорів

Плівки осаджувалися на nanoцелюлозну підкладку методом високочастотного магнетронного розпилення при температурі 50°C. Така температура була обрана через невисоку температурну стійкість nanoцелюлози (< 100 °C). У табл.4.4 наведено деякі параметри технологічного процесу нанесення плівки нікелю на nanoцелюлозну підкладку.

Таблиця 4.4 – Параметри технологічного процесу нанесення плівки нікелю на гнучку підкладку з целюлози

1.	Час осадження, хв	10
2.	Напруга розпилення, В	600
3.	Струм розпилення, А	1
4.	Товщина плівок, мкм	0.2

Для задання геометричної конфігурації резистора було використано два типи масок – немагнітна і магнітна. Було отримано 7 зразків, яким для зручності було видано числобуквенні індекси: 1нм – зразок номер 1, немагнітна маска, 2м – зразок номер 2, магнітна маска. У табл.4.5 наведено геометричні параметри отриманих зразків.

Таблиця 4.5 – Параметри отриманих зразків

Номер зразка	Довжина нікелевого шару, мм	Ширина нікелевого шару, мм	Товщина нікелевого шару, мкм	Тип маски
1нм	20	2,0	0,2	Немагнітна
2нм	25	2,5	0,2	Немагнітна
3нм	25	1,5	0,2	Немагнітна
4нм	25	1,0	0,2	Немагнітна

Продовження таблиці 4.5

1м	15	1,0	0,2	Магнітна
2м	30	1,5	0,2	Магнітна
3м	20	0,5	0,2	Магнітна

4.3. Вимірювання залежності опору сенсора від його вигину

Для проведення вимірювань розрахуємо величину лінійного видовження поверхні зразка для наших деформованих підкладок на основі методики, викладеної у попередньому розділі (табл.4.6).

Таблиця 4.6 – Залежність лінійного видовження поверхні деформаційної підкладки від величини вигину її середньої точки

Величина відхилення середньої точки відносно крайніх, мм	Лінійне видовження, %
0	0
0,1	1,070472792
0,2	2,124520508
0,3	3,155127082
0,4	4,155844156
0,5	5,120910384
0,6	6,04534005
0,7	6,92497939
0,8	7,756531107
0,9	8,537549407
1	9,266409266
1,1	9,942254582
1,2	10,5649303
1,3	11,1349036
1,4	11,65317919

Продовження таблиці 4.6

1,5	12,12121212
1,6	12,54082299
1,7	12,9141169
1,8	13,24340895
1,9	13,53115727
2	13,77990431

Розглянемо для початку промисловий зразок тензорезистора від групи компаній “Веда”, що буде використаний в даній роботі як еталонний зразок.

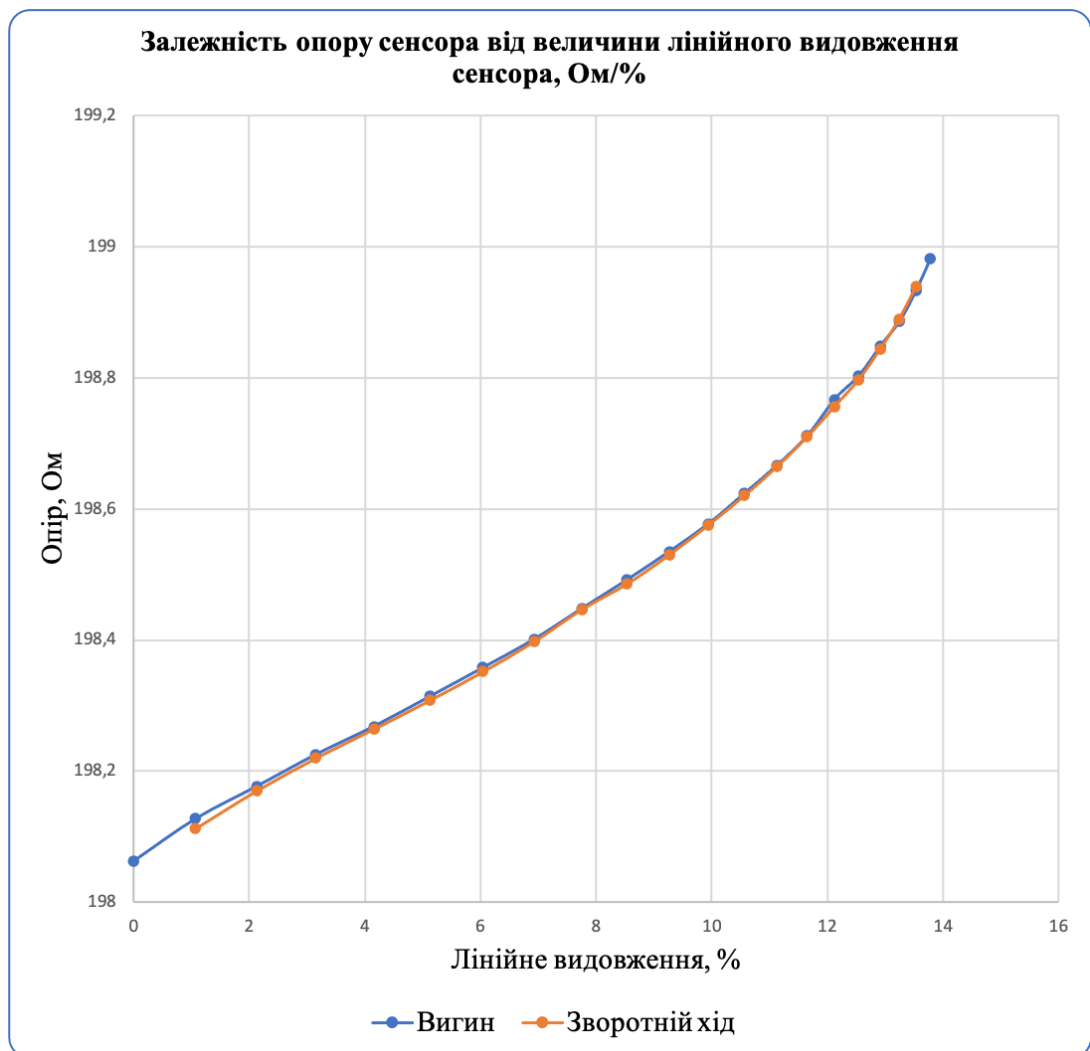


Рисунок 4.1 – Залежність зсуву напруги на вимірювальному мості Уїтстона від величини вигину пластини для сенсора ГК “Веда”

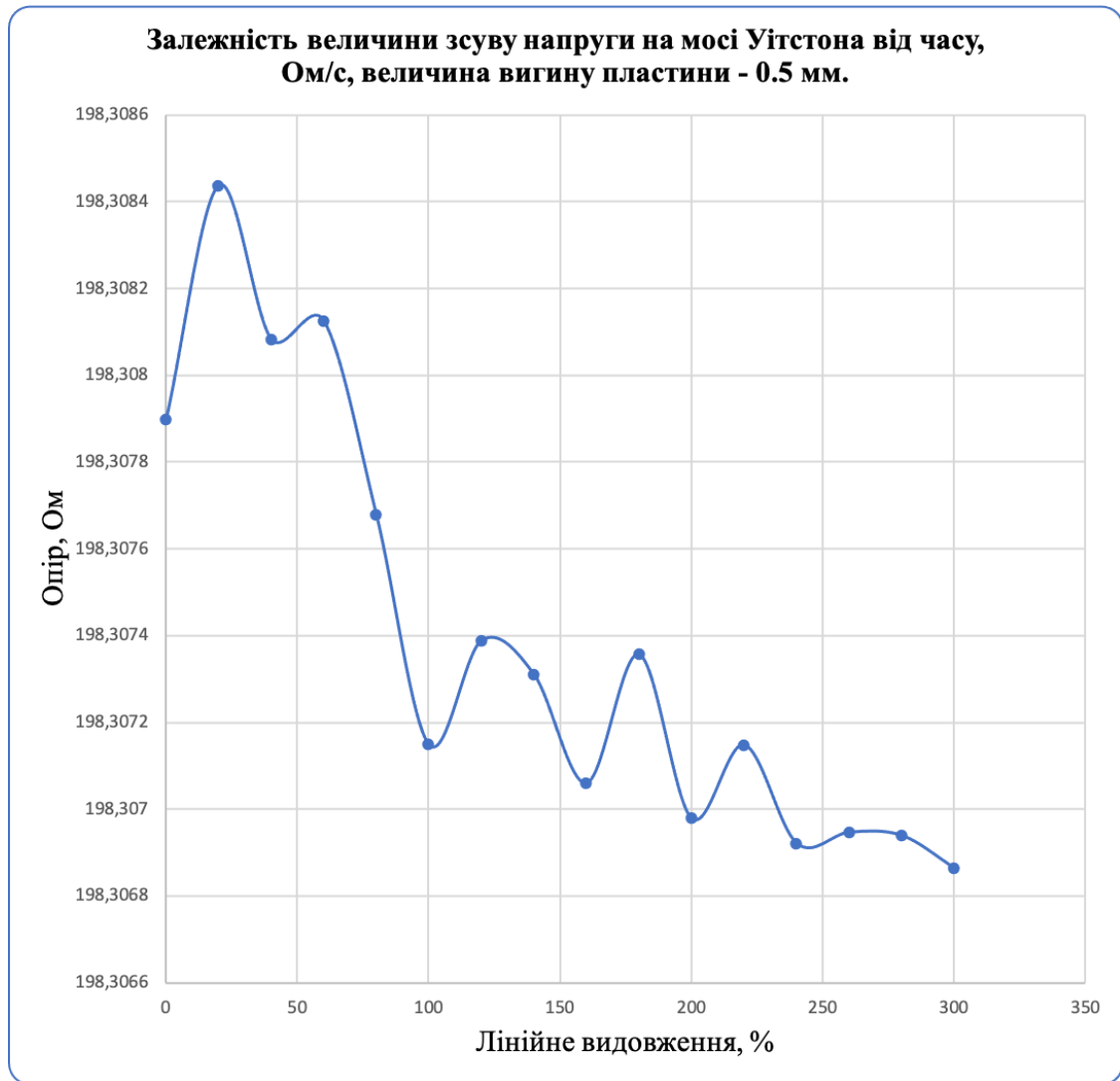


Рисунок 4.2 – Залежність величини зсуву напруги на мості Уїтстона від часу для сенсора ГК “Веда” за фіксованої величини вигину пластини – 0.5 мм

На рис. 4.1. та 4.2 наведено тензочутливі та стабільності характеристики еталонного сенсора, виміряні на розробленому у роботі стенді. На основі цих характеристик були розраховані коефіцієнт тензочутливості та величину часової нестабільності за постійного вигину (повзучість). Результати розрахунків занесені у табл.4.7.

Проаналізувавши графіки можна зробити висновок про те, що сенсор виробництва ГК “Веда” суперлінійний у всьому діапазоні вимірювань, він поводить себе однаково при прикладанні та при знятті навантаження.

Таблиця 4.7 – Параметри еталонного зразка

Номер зразку	Номінальний опір, Ом	Коефіцієнт тензочутливості, %	Відносна зміна опору, %	Нестабільність, %/хв
Веда	198	0,033665927	0,461771036	0,067363316

Стабільність сенсора є на дуже високому рівні. За 5 хв показники сенсора змінилися лише на 0.33%. Усі інші результати вимірювань в подальшому ми будемо порівнювати з цими результатами.

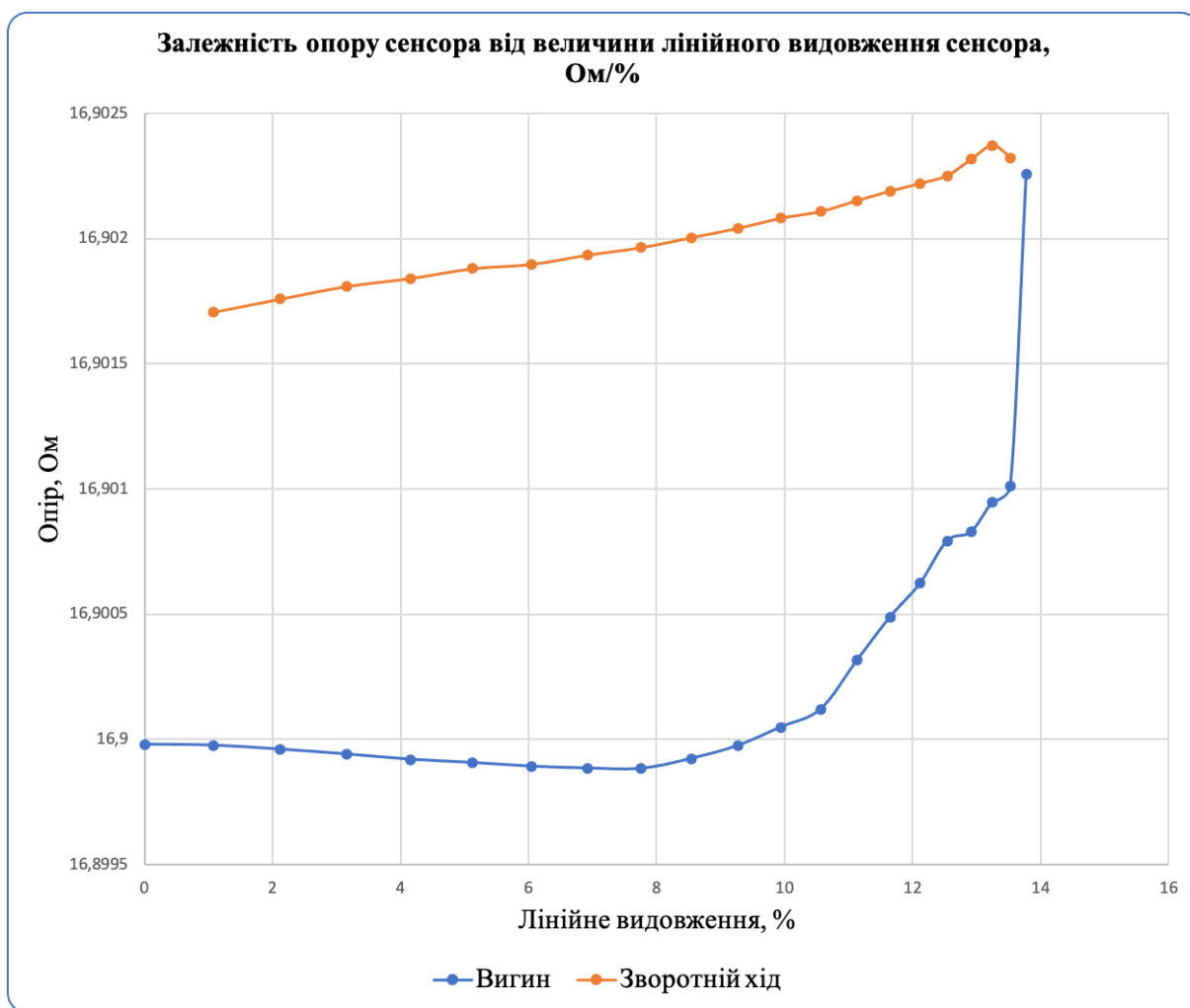


Рисунок 4.3 – Залежність зсуву напруги на вимірювальному мості Уїтстона від величини вигину пластини. Сенсор на основі плівки наноцелюлози, зразок “2НМ”

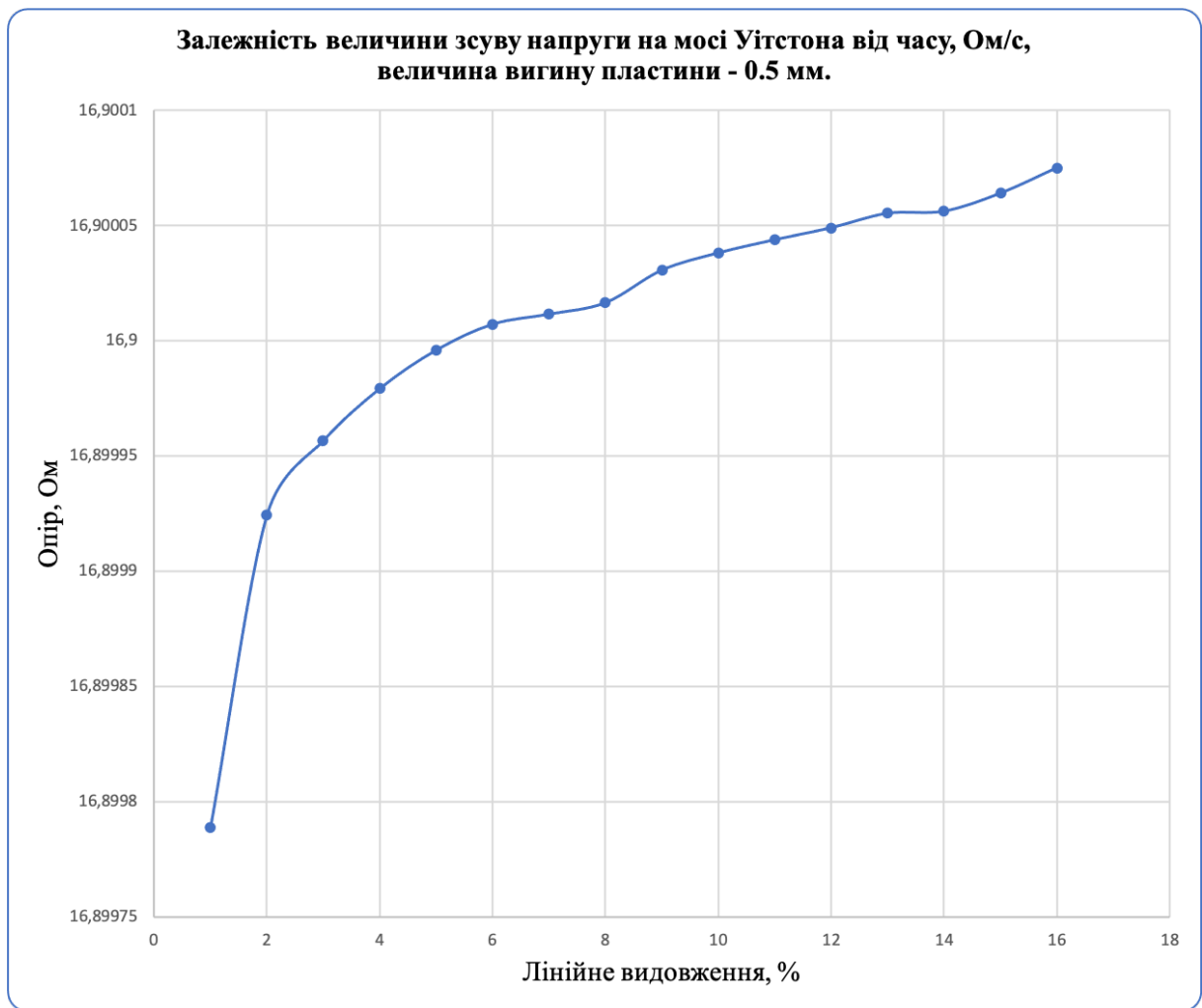


Рисунок 4.4 – Залежність величини зсуву напруги на мості Уїтстона від часу. Величина вигину пластини – 0.5 мм. Сенсор на основі плівки наноцелюлози, зразок “2НМ”

На рис. 4.3 та 4.4 наведено тензочутливі та стабільності характеристики сенсора “2НМ”, виміряні на розробленому у роботі стенді. На основі цих характеристик були розраховані коефіцієнт тензочутливості та величину часової нестабільності за постійного вигину (повзучість). Результати розрахунків занесені у табл.4.8.

Таблиця 4.8 – Параметри зразка сенсора “2НМ”

Номер зразку	Номінальний опір, Ом	Коефіцієнт тензочутливості, %	Відносна зміна опору, %	Нестабільність, %/хв
2нм	16,9	0,000155654	0,013478086	76,20772947

Проаналізувавши графіки за даним зразком можна відмітити той факт, що сенсор вийшов доволі лінійним, але під час зняття навантаження з пластини значення не повертаються у вихідну точку. Також хочеться відмітити високу нестабільність показників сенсора у часі. За 5 хв дії вигину значення сенсора змінилися на 381,06%.

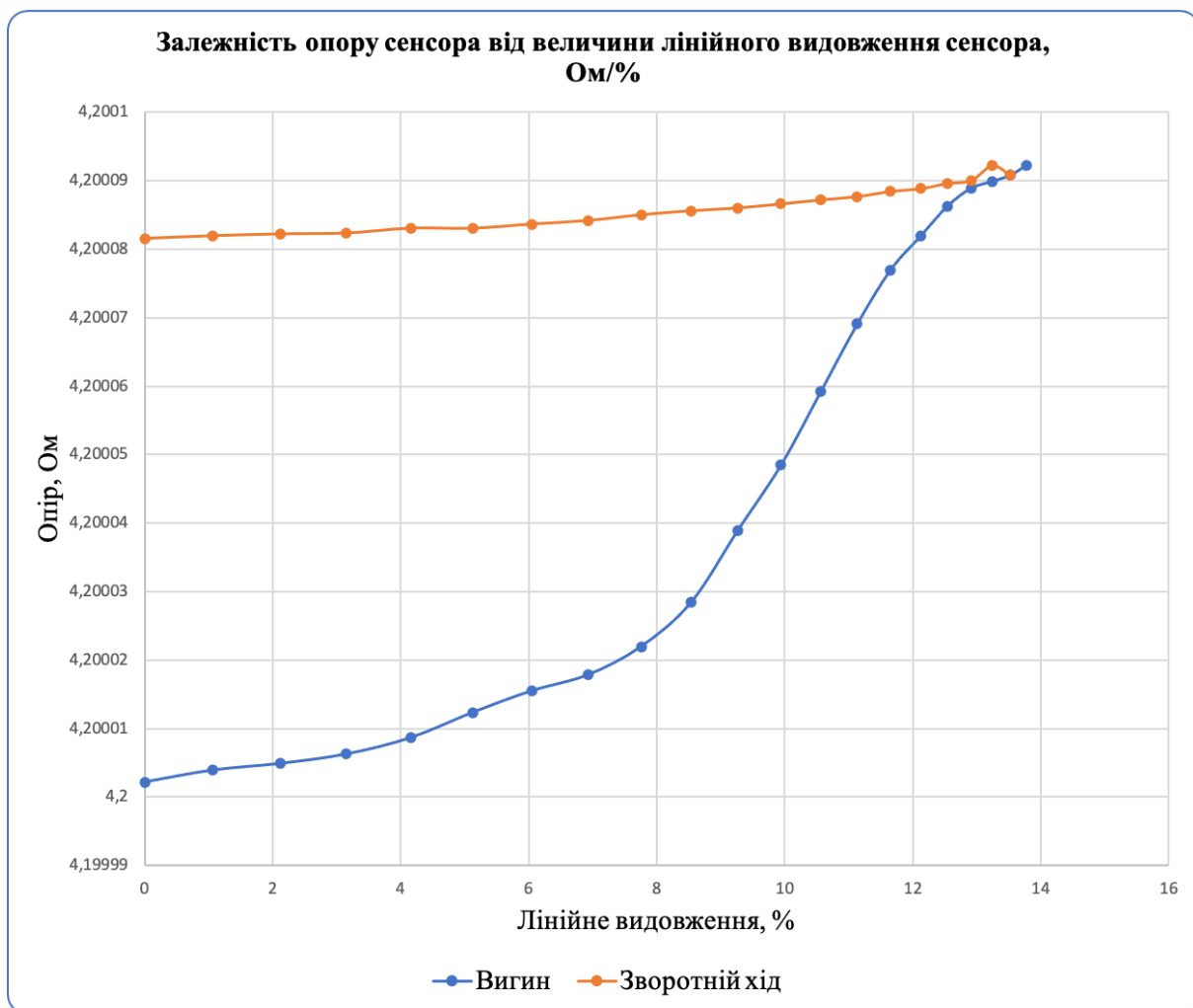


Рисунок 4.5 – Залежність зсуву напруги на вимірювальному мості Уїтстона від величини вигину пластини. Сенсор на основі плівки наноцелюлози, зразок “ЗНМ”

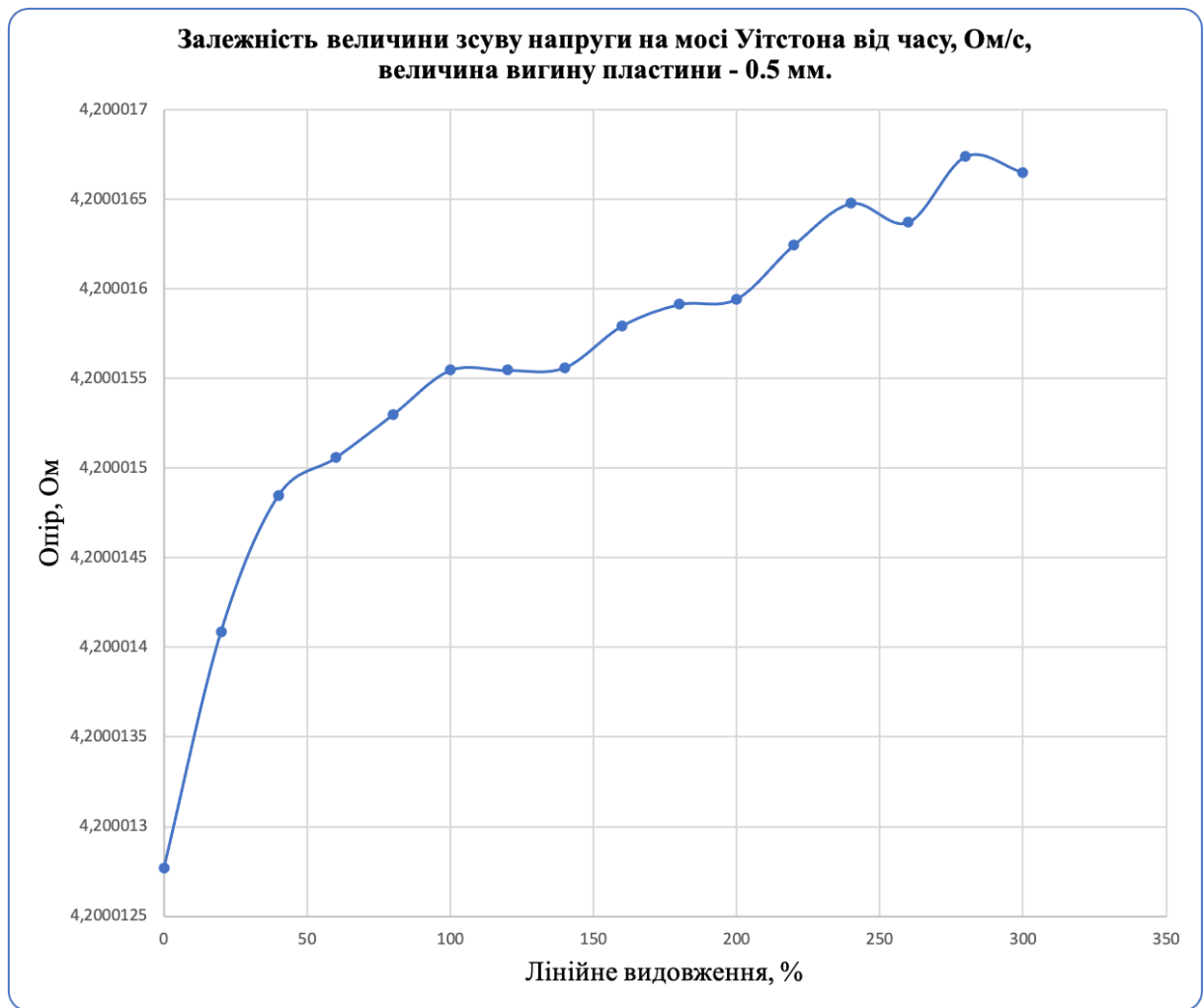


Рисунок 4.6 – Залежність величини зсуву напруги на мості Уїтстона від часу. Величина вигну пластини – 0.5 мм. Сенсор на основі плівки наноцелюлози, зразок “ЗНМ”

На рис. 4.5 та 4.6 наведено тензочутливі та стабільності характеристики сенсора “ЗНМ”, виміряні на розробленому у роботі стенді. На основі цих характеристик були розраховані коефіцієнт тензочутливості та величину часової нестабільності за постійного вигину (повзучість). Результати розрахунків занесені у табл.4.9.

Таблиця 4.9 – Параметри зразка “ЗНМ”

Номер зразку	Номінальний опір, Ом	Коефіцієнт тензочутливості, %	Відносна зміна опору, %	Нестабільність, %/хв
ЗНМ	4,2	0,000155654	0,00214485	4,663960307

Проаналізувавши графіки за даним зразком можна відмітити той факт, що сенсор має не дуже добру лінійність показників і під час зняття навантаження з пластини значення не повертаються у вихідну точку. Також хочеться відмітити доволі високу нестабільність показників сенсора у часі. За 5 хв значення сенсора змінилися на 23,31%.

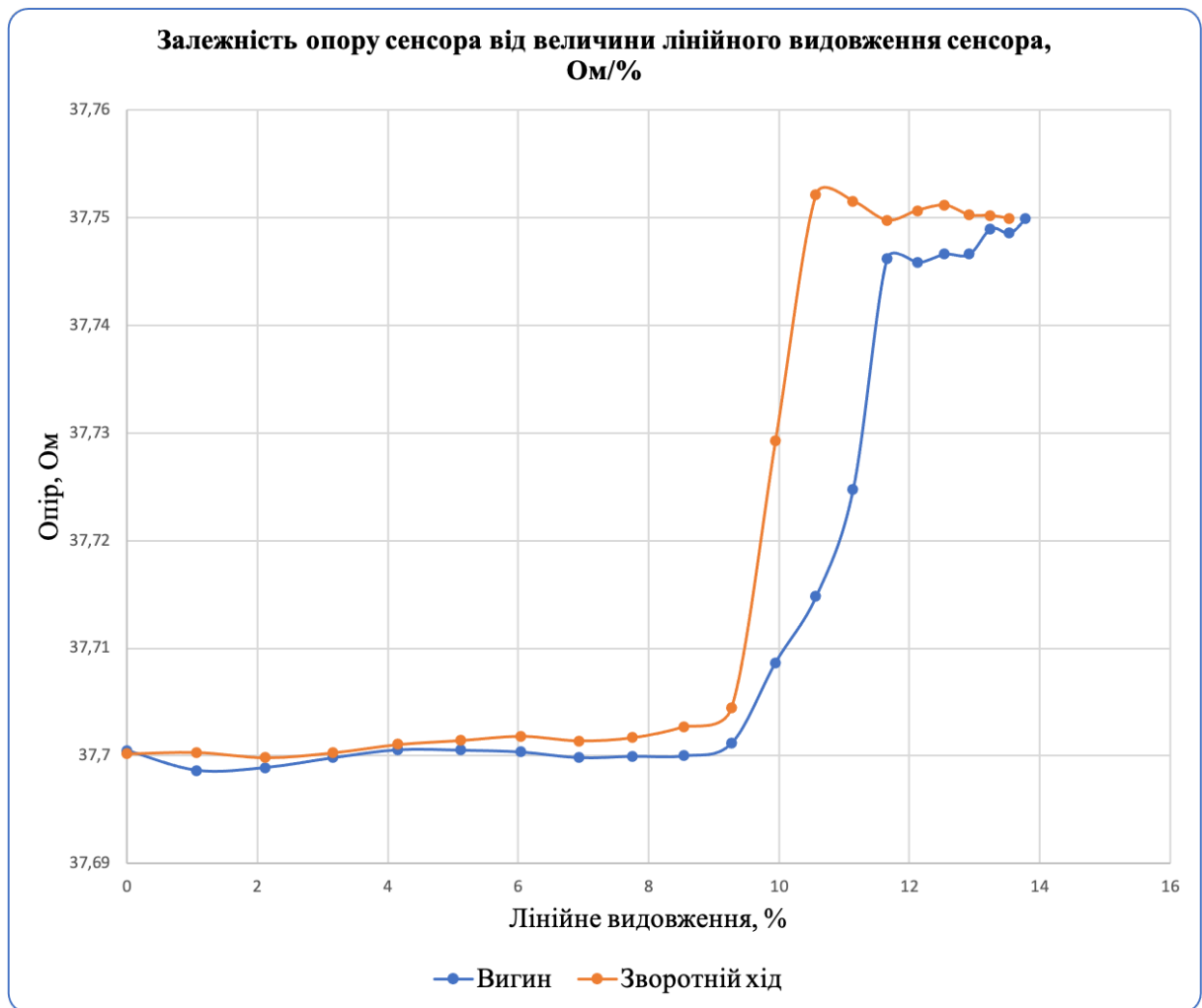


Рисунок 4.7 – Залежність зсуву напруги на вимірювальному мості Уїтстона від величини вигину пластини. Сенсор на основі плівки наноцелюлози, зразок “1НМ”

На рис. 4.7 та 4.8 наведено тензочутливі та стабільності характеристики сенсора “1НМ”, виміряні на розробленому у роботі стенді. На основі цих характеристик були розраховані коефіцієнт тензочутливості та величину часової нестабільності за постійного вигину (повзучість). Результати розрахунків занесені у табл.4.10.

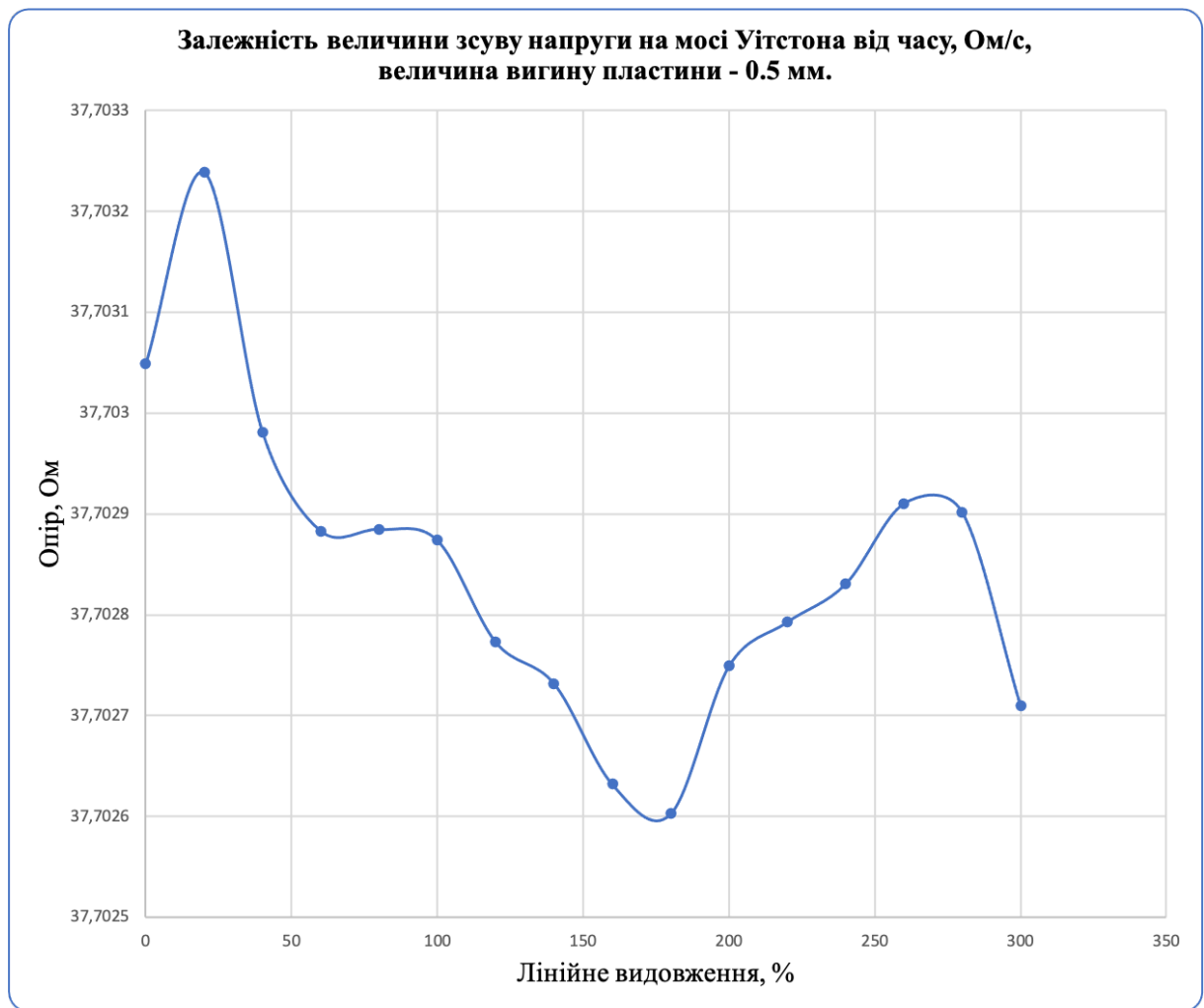


Рисунок 4.8 – Залежність величини зсуву напруги на мості Уїтстона від часу. Величина вигину пластини – 0.5 мм. Сенсор на основі плівки наноцелюлози, зразок “1НМ”

Таблиця 4.10 – Параметри зразка “1НМ”

Номер зразку	Номінальний опір, Ом	Коефіцієнт тензочутливості, %	Відносна зміна опору, %	Нестабільність, %/хв
1нм	37,7	0,009511034	0,13088959	2,497450312

Проаналізувавши графіки за даним зразком можна відмітити той факт, що сенсор зовсім не має зони лінійності показників і він навряд придатний для проведення будь-яких вимірювань. Також хочеться відмітити доволі високу стабільність показників сенсора у часі. За 5 хв значення сенсора змінилися на 12,06%.

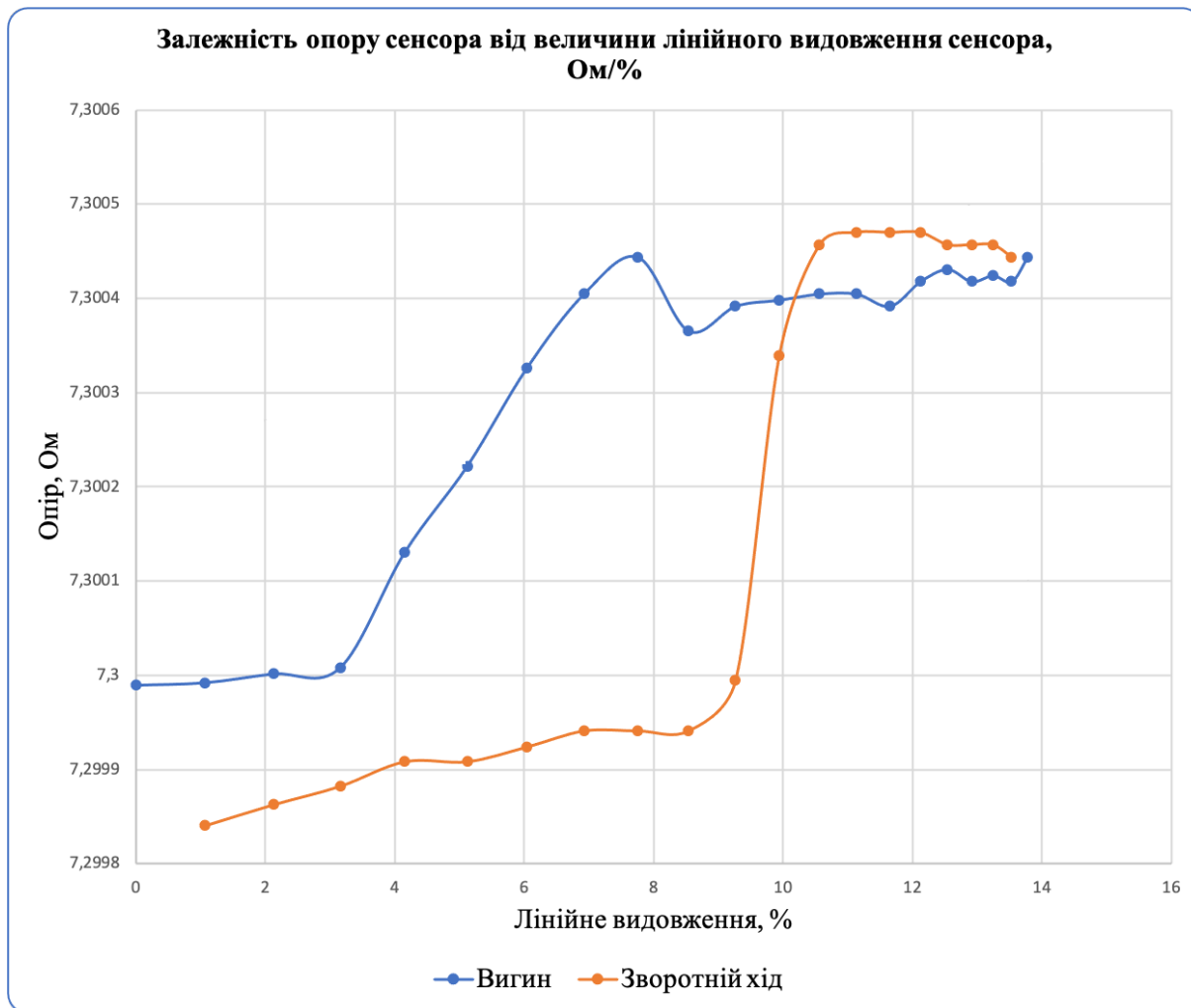


Рисунок 4.9 – Залежність зсуву напруги на вимірювальному мості Уїтстона від величини вигину пластини. Сенсор на основі плівки наноцелюлози, зразок “2М”

На рис. 4.9 та 4.10 наведено тензочутливі та стабільності характеристики сенсора “2М”, виміряні на розробленому у роботі стенді. На основі цих характеристик були розраховані коефіцієнт тензочутливості та величину часової нестабільності за постійного вигину (повзучість). Результати розрахунків занесені у табл.4.11.

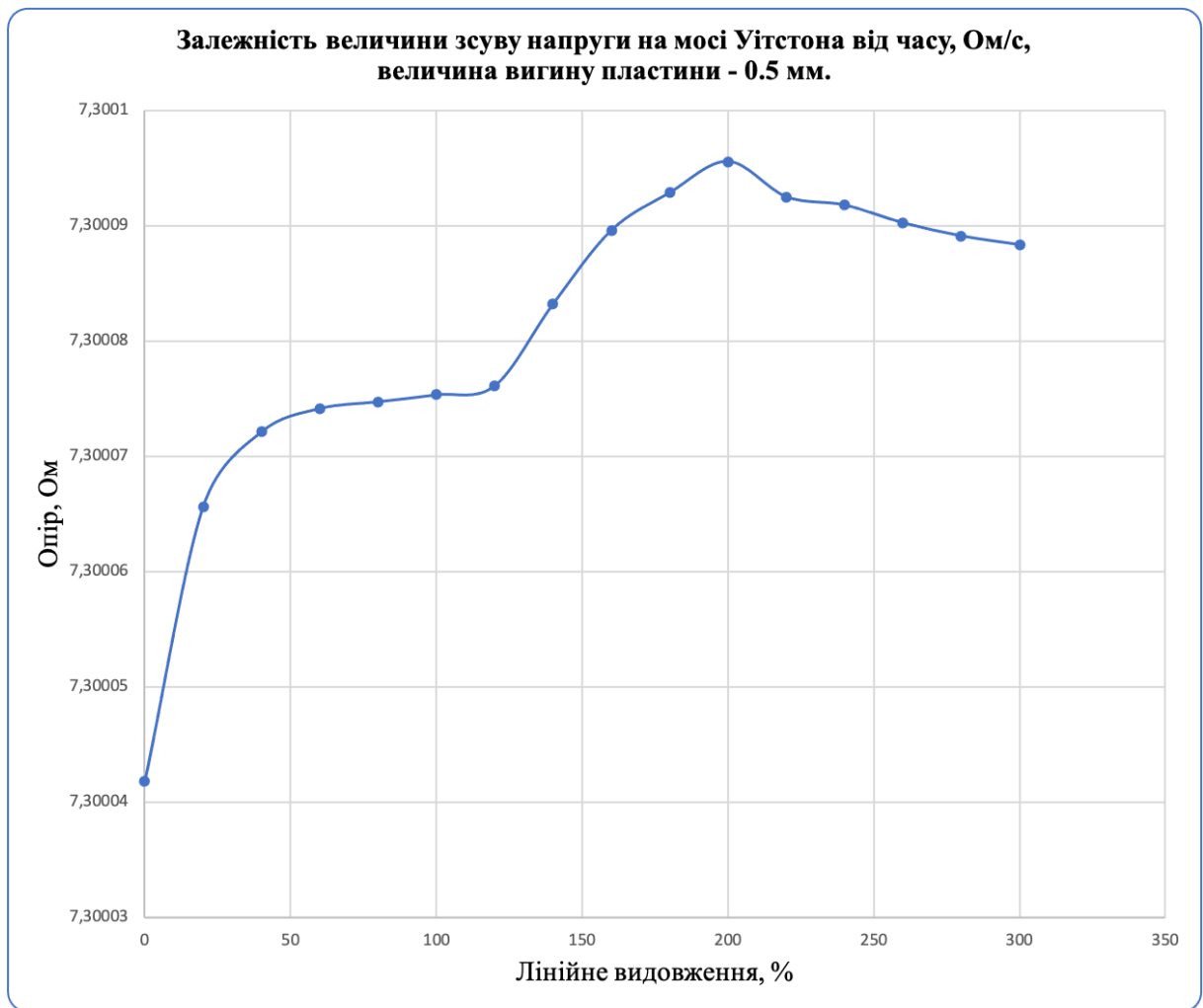


Рисунок 4.10 – Залежність величини зсуву напруги на мості Уїтстона від часу. Величина вигину пластини – 0.5 мм. Сенсор на основі плівки наноцелюлози, зразок “2М”

Таблиця 4.11 – Параметри зразка 2М

Номер зразку	Номінальний опір, Ом	Коефіцієнт тензочутливості, %	Відносна зміна опору, %	Нестабільність, %/хв
2м	7,3	0,000451594	0,006222531	10,54233782

Проаналізувавши графіки за даним зразком можна відмітити той факт, що сенсор має зону лінійності, але під час зняття навантаження з пластини значення не повертаються у вихідну точку. Також хочеться відмітити високу нестабільність показників сенсора у часі. За 5 хв значення сенсора змінилися на 52,71%.

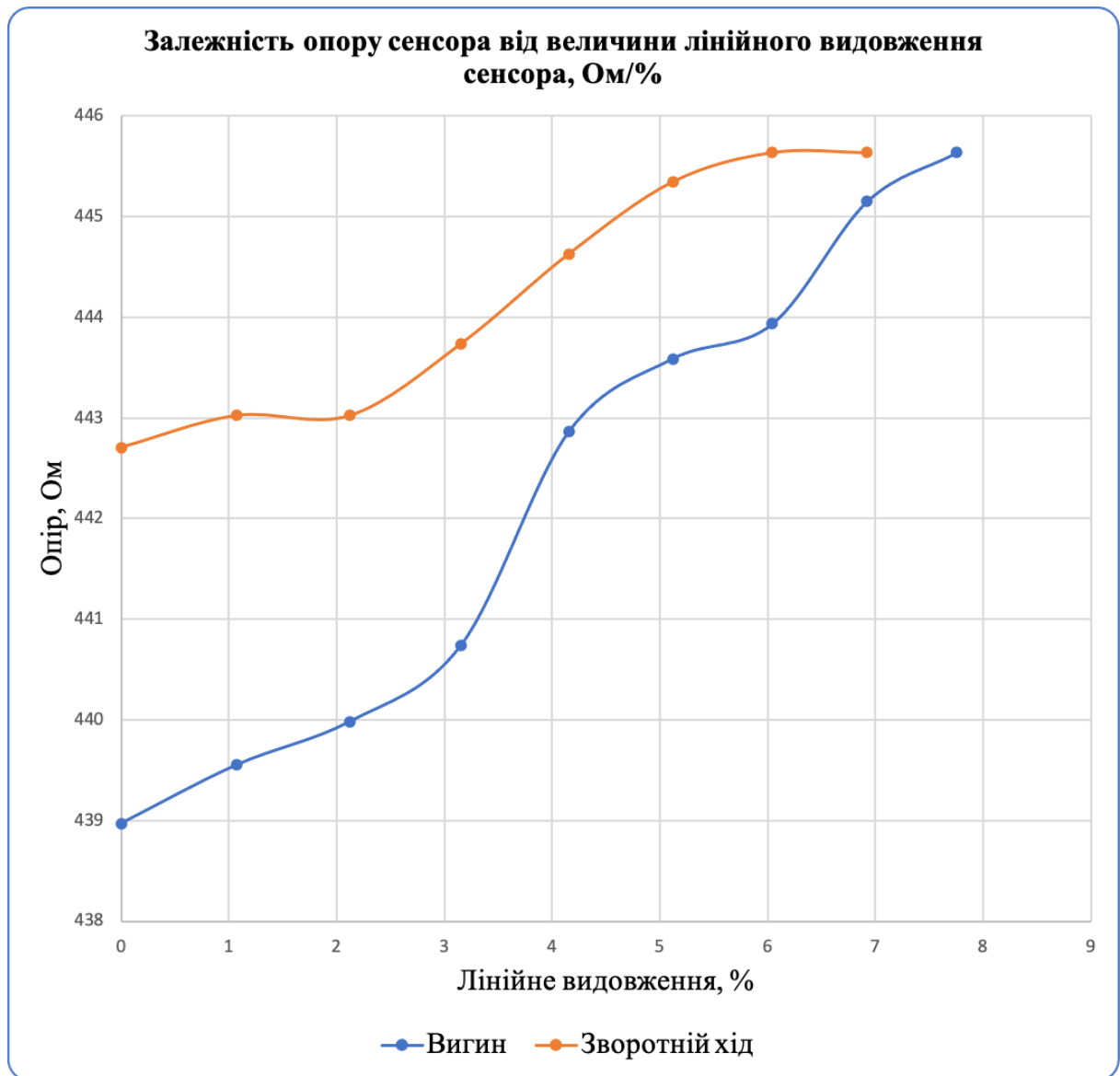


Рисунок 4.11 – Залежність зсуву напруги на вимірювальному мості Уїтстона від величини вигину пластини. Сенсор на основі плівки наноцелюлози, зразок “1М”

На рис. 4.11 та 4.12 наведено тензочутливі та стабільності характеристики сенсора “1М”, виміряні на розробленому у роботі стенді. На основі цих характеристик були розраховані коефіцієнт тензочутливості та величину часової нестабільності за постійного вигину (повзучість). Результати розрахунків занесені у табл.4.12.

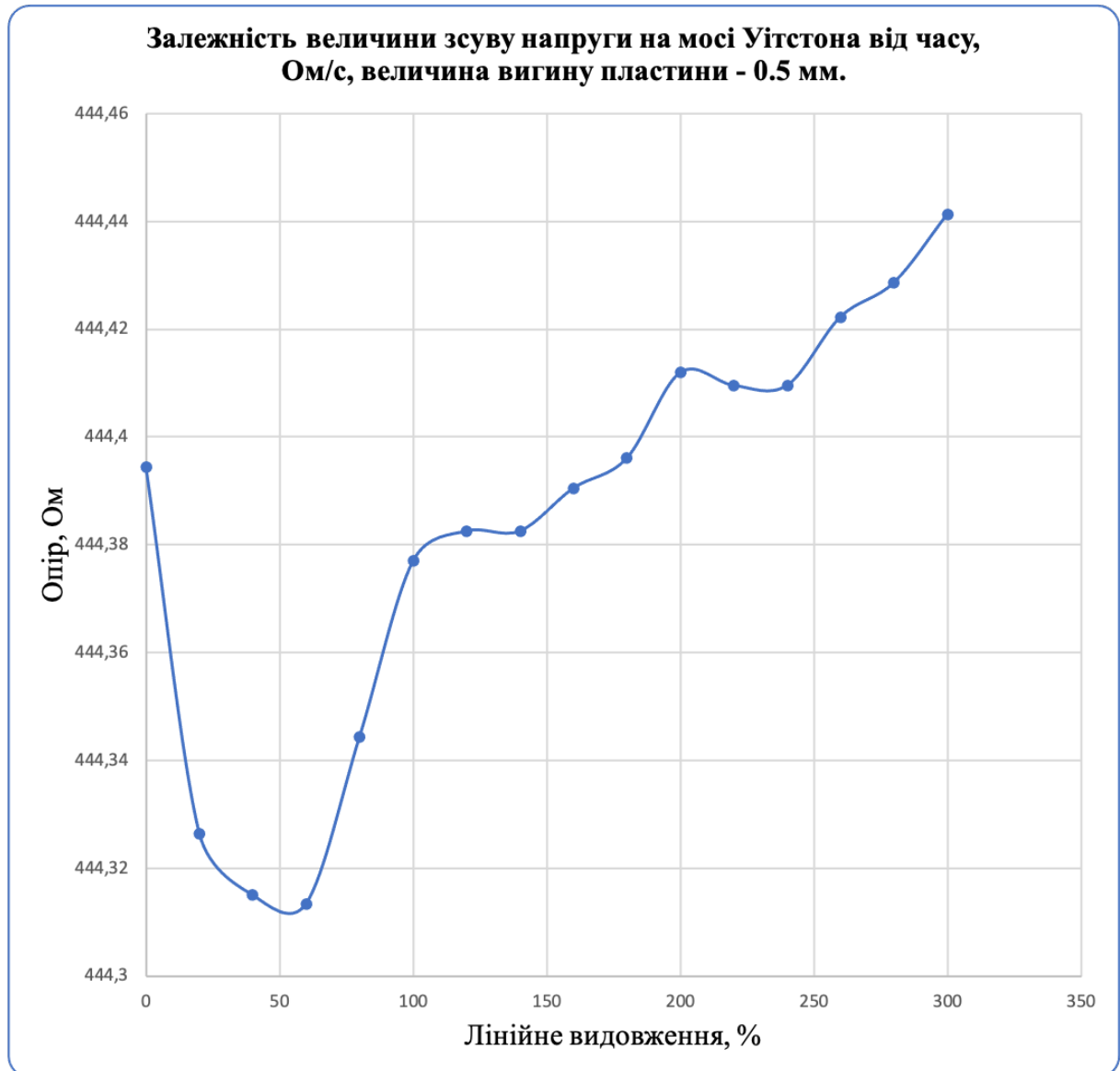


Рисунок 4.12 – Залежність величини зсуву напруги на мості Уїтстона від часу. Величина вигину пластини – 0.5 мм. Сенсор на основі плівки наноцелюлози, зразок “1М”

Таблиця 4.12 – Параметри зразка 1М

Номер зразку	Номінальний опір, Ом	Коефіцієнт тензочутливості, %	Відносна зміна опору, %	Нестабільність, %/хв
1м	439	0,195782871	1,495879563	0,17128756

Проаналізувавши графіки за даним зразком можна відмітити той факт, що сенсор вийшов доволі лінійним, під час зняття навантаження з пластини значення не повертаються у вихідну точку, але на фоні інших зразків цей показує себе найкраще. Хочеться відмітити дуже високу стабільність показників сенсора у часі. За 5 хв значення сенсора змінилися на 0,85%. Можна зробити висновок, що цей зразок є найвдалішим.

4.4. Вплив технологічних і геометричних параметрів на характеристики сенсорів

Зберемо отримані в попередньому розділі дані в табл.4.13 та 4.14 та відсортуємо за відсотком нестабільності та за коефіцієнтом тензочутливості для того, щоб прослідкувати закономірності впливу технологічних і геометричних параметрів.

Таблиця 4.13 – Робочі параметри одержаних у роботі сенсорів, відсортовані за відсотком нестабільності

№ зразку сенсора	Коефіцієнт тензочутливості, %	Величина нестабільності, %/хв	Номинальний опір, Ом
Веда	0,033665927	0,067363316	198
1м	0,195782871	0,17128756	439
1нм	0,009511034	2,497450312	37,7
3нм	0,000155654	4,663960307	4,2
2м	0,000451594	10,54233782	7,3
2нм	0,000978229	76,20772947	16,9

Опрацювавши дані можна помітити деякі закономірності. Наприклад, зі збільшенням номінального опору сенсора зростає коефіцієнт тензочутливості та зменшується відсоток часової нестабільності.

Таблиця 4.14 – Робочі параметри одержаних у роботі сенсорів, відсортовані за коефіцієнтом тензочутливості

№ зразку сенсора	Коефіцієнт тензочутливості, %	Величина нестабільності, %/хв	Номінальний опір, Ом
1м	0,195782871	0,17128756	439
Веда	0,033665927	0,067363316	198
1нм	0,009511034	2,497450312	37,7
2нм	0,000978229	76,20772947	16,9
2м	0,000451594	10,54233782	7,3
3нм	0,000155654	4,663960307	4,2

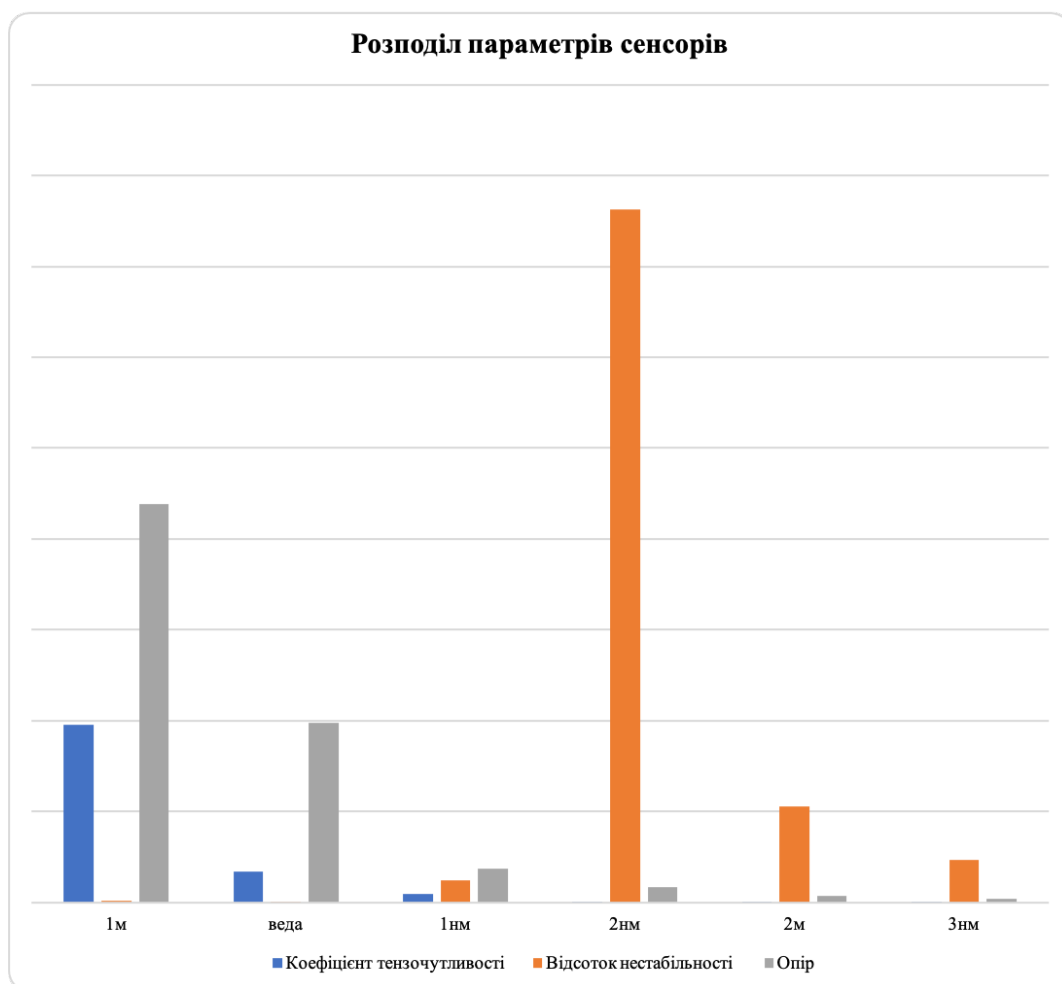


Рисунок 4.13 – Порівняльна діаграма робочих параметрів сенсорів, одержаних в даній роботі

5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

5.1. Опис ідеї проекту

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Виготовлення біорозкладних тензорезисторів на основі плівок наноцелюлози	1. Тензометрія	Вимірювання згину та розтягнення. Виготовлення вагів.
	2. Авіакосмічна галузь	Використання у літальних апаратах для контролю стану обшивки.

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1.	Економічні	0,2 у. о.	1 у.о.	0,8 у.о.	0,7 у.о.	-		
2.	Призначення	Датчик для вимірювання механічних	Датчик для вимірювання механічних	Датчик для вимірювання механічних	Датчик для вимірювання механічних			+

Продовження таблиці 5.2

		их полів (розтягнення, стискання)	х полів (розтягнення, стискання)	них полів (розтягнення, стискання)	их полів (розтягнення, стискання)			
3.	Надійність	Довговічність – 10 років	Довговічність – 10 років	Довговічність – 10 років	Довговічність – 10 років	+		
4.	Технологічні	Установка за допомогою приклеювання	Установка за допомогою приклеювання	Установка за допомогою приклеювання	Установка за допомогою приклеювання		+	
5.	Ергономічні	-	-	-	-		+	
6.	Органолептичні	-	-	-	-		+	
7.	Естетичні	-	-	-	-		+	
8.	Транспортабельності	Поставляється у будь-якій кількості, у пластиковій упаковці	Поставляється у лише від 100 шт., у пластиковій упаковці.	Поставляється у лише від 1000 шт., у пластиковій упаковці.	Поставляється у лише від 1000 шт., у пластиковій упаковці.		+	

Продовження таблиці 5.2

9.	Екологічність і	Екологічно, біорозкладає продукція	Не екологічно, використання нерозкладних лаків.	Не екологічно, використання нерозкладних лаків.	Не екологічно, використання нерозкладних лаків.		+	
10.	Безпеки	Безпечно	Безпечно	Безпечно	Безпечно		+	

Конкурент 1: Виробник сенсорів "ГК "Веда" ".

Конкурент 2: Виробник сенсорів "ESIT ".

Конкурент 3: Виробник сенсорів UTILLCEL ".

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Виготовлення тензорезисторів на основі плівок наноцелюлози.	Виготовлення наноцелюлози, виготовлення плівки, нанесення металічного шару на плівку, створення омичних	Наявна	Доступно

Продовження таблиці 5.3

	контактів.		
Технологія розроблена і придатна для запуску серійного виробництва.			

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	0
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од.	3000 ум.од.
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Розгортання великого виробництва
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	250%

Ринок є привабливим для входження через відсутність на ньому саме біорозкладних сенсорів.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Використання біорозкладних,	Компанії-виробники вагів,	-	Товар має виконувати ті

Продовження таблиці 5.5

	більш екологічних сенсорів.	авіакосмічна галузь		самі функції, що й існуючі тензорезистори, але при цьому бути біорозкладним.
--	-----------------------------	---------------------	--	--

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Наявність кваліфікованих кадрів	Продукт є наукоємким тому потрібні люди з певними навичками	Пошук персоналу у науково-дослідних інститутах та організаціях
2	Потреба в ресурсах	Для створення продукту потрібне технічне забезпечення та певні умови для тестування працездатності	Створення дорогої виробничої лінії.

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Є загроза виготовлення іншими гравцями на ринку біорозкладних сенсорів.	Покращення характеристик товару
2.	Попит	Зараз у світі розвивається тенденція	Покращення характеристик товару

Продовження таблиці 5.7

	перетворення електронних компонентів у біорозкладні для спрощення переробки.	
--	--	--

Таблиця 5.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: Поліполія	Велика кількість компаній присутня на ринку.	Підвищувати якість товару за рахунок залучення кваліфікованого персоналу та використання передових технологій.
2. Рівень конкурентної боротьби: Міжнародний	Територіальне розташування підприємств не обмежується;	Створювати інтернет ресурс, вкладати кошти в міжнародний маркетинг
3. Галузева ознака: Внутрішньогалузева	Економічна боротьба між різними виробниками, які працюють в одному секторі економіки, виробляють і продають однакові товари, що задовольняють однакові потреби, але мають різницю у виробничих	Слідкування за продукцією конкурентів

Продовження таблиці 5.8

	витратах, якості, ціні тощо.	
4. Конкуренція за видами товарів: Товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду	Покращувати якість товару
5. За характером конкурентних переваг: Цінова	Передбачає продаж продукції за більш низькими цінами, ніж конкуренти.	Оптимізувати виробничі процеси задля зменшення собівартості одиниці продукції
6. За інтенсивністю: Немарочна	Роль торгової марки незначна	Реклама товару

Таблиця 5.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	"ГК "Веда"" "ESIT" "UTILLCEL"	Немає	Товар продається безпосередньо розробниками	Вимоги до якості і довговічності	Замінники в немає
Висновки:	Інтенсивність досить висока, конкуренти вже давно на ринку	Немає	Постачальники не диктують умови роботи на ринку	Товар має бути якісним і довговічним	Обмежень немає

Для того, щоб бути конкурентоспроможним на ринку для розробки товару потрібно залучати висококваліфікованих спеціалістів у галузі науки та інженерів для покращення якості товару.

Таблиця 5.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Біорозкладність сенсорів	Жоден з конкурентів не має у своїй лінійці сенсорів, що здатні розкладатися самостійно.
2.	Якість розробки з точки зору показників якості та довговічності	Продукт має видавати стабільно високий відсоток розпізнавання при різних станах навколишнього середовища.
3.	Наявність наукових ресурсів	Для покращення якості продукції та технологічного шляху потрібні наукові ресурси
4.	Економічний (ціна товару)	Ціна товару не має бути занадто висока, щоб знайти потенційних покупців.

Таблиця 5.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з “Веда”						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Біорозкладність сенсорів	20	+						
2.	Якість розробки з точки зору показників якості та довговічності	10					+		
3.	Наявність наукових ресурсів	16				+			
4.	Економічний (ціна товару)	15	+						

Таблиця 5.12 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Біорозкладність сенсорів	Слабкі сторони: гірші характеристики сенсорів у порівнянні з
---	--

Продовження таблиці 5.12

	небіорозкладними сенсорами конкурентів
Можливості: Широке впровадження біорозкладних сенсорів	Загрози: є вірогідність того, що інші виробники теж почнуть розробку таких продуктів

Таблиця 5.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Пошук компаній збуту, пошук інвесторів, пошук наукових ресурсів, налагодження виробництва, вихід на ринок	80 %	2 роки
2.	Пошук інвесторів, пошук компаній збуту, налагодження виробництва, пошук наукових ресурсів, вихід на ринок	60%	3 роки

Обрано альтернативу № 1.

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 5.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Великі промислові компанії	Готові	Високий	Висока	Висока
Які цільові групи обрано: обрано цільову групу №1.					

Таблиця 5.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/ п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспромо жні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	1	Завдяки великим можливостям продажу товарів (портфель контрактів на поставку) та продуктивності праці, компанія може досягти менших витрат.	Витрати на виробництво	Стратегія лідерства на характеристиках

Обрано стратегію лідерства на характеристиках.

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Так	Так	Так, показники довговічності	Виклику лідера

Таблиця 5.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспромо жні позиції власного стартап- проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Наявність у їх продукції тензорезисто рів	Лідерство на характери стиках	Біорозкладність сенсорів	Оптимальне співвідношення ціна/якість, оптимізоване виробництво, співпраця.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 5.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує	Ключові переваги перед
---	---------	----------------------	------------------------

Продовження таблиці 5.18

п/п		товар	конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Наявність на ринку біорозкладних тензорезисторів.	Біорозкладність сенсорів. Відсутність необхідності утилізації.	У конкурентів відсутні біорозкладні сенсори.

Таблиця 5.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові	
1. Товар за задумом	Біорозкладний тензорезистор.	
2. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	Наявність
	Біорозкладний сенсор з параметрами, що не поступаються існуючим небіорозкладним аналогам	Так
	Якість: довговічність 10 років,	
	Пакування: Пластикові упаковка	
	Марка: "BoiTenzoTech"	
3. Товар із підкріпленням	До продажу: будь-яка кількість сенсорів у партії.	
	Після продажу: документація.	
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патент.		

Таблиця 5.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-	Рівень цін на товари-	Рівень доходів цільової групи	Верхня та нижня межі встановлення ціни на
-------	-----------------------	-----------------------	-------------------------------	---

Продовження таблиці 5.20

	замінники	аналоги	споживачів	товар/послугу
	-	-	10000 у.о. і вище.	0.3 – 0.3 у.о./од

Таблиця 5.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Замовлення товару безпосередньо на виробництві	Встановлення контакту, інформування, поділ, зберігання, сортування	Канал нульового рівня	Виробник безпосередньо збуває продукцію контрагентам

Таблиця 5.22 – Концепція маркетингових комунікацій.

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонуван ня	Завдання рекламного повідомлен ня	Концепція рекламного звернення
	Застосува ння товару для виробницт ва своїх приладів,	Прямі - канал комунікації, інформація передається безпосередньо від	Біорозкладні сть сенсорів.	Поширення знань про підприємст во і характерист ики товару	Звернення засноване на відмінностях між рекламованим товаром і тим, що пропонують

Продовження таблиці 5.22

у конструкц ії яких передбаче на наявність тензорезис торів	інформатора до інформованої особи.		серед можливих компаній- клієнтів. Звернення уваги на біорозкладн ість сенсорів	конкуренти. Звернення ґрунтується на тому чи іншому мотиваційному підході, покликаному впливати на споживчі переваги покупців - наприклад, функціональну перевагу, задоволення, імідж, захоплення і альтруїзм.
--	---	--	---	---

Висновки

Можливість виведення на ринок даного проекту є дуже високою, так як у конкурентів відсутні подібні технології та подібні товари. Потенціальним покупцям буде дуже цікаво використовувати у своїх приладах біорозкладні сенсори, тому що світ зараз націлений на зменшення забруднення навколишнього середовища та на спрощену утилізацію електронних відходів.

ВИСНОВКИ

Під час виконання дипломної роботи було проведено аналіз матеріалів підкладок для гнучкої електроніки (неорганічні надтонкі підкладки (ситал, фотоситал, кераміка) органічні матеріали (поліаміди, полівінілхлорид, полікарбонати), nanoцелюлозні матеріали), а також проаналізовано методику дослідження гнучких сенсорів фізичних величин, вивчено явище тензоефекту.

В експериментальній частині роботи було спроектовано та створено стенд для вимірювання залежності опору тензорезистора від величини вигину тестового зразка, а також синтезовано гнучкі сенсори механічних полів на основі nanoцелюлози. В роботі були проведені вимірювання робочих характеристик отриманих зразків, визначено величину їх тензочутливості та часової стабільності під дією постійного вигину (повзучість).

З аналізу одержаних результатів можна зробити висновок, що в залежності від технологічного процесу виготовлення сенсорів мають місце певні закономірності, а саме: зі збільшенням номінального опору сенсора зростає коефіцієнт тензочутливості та зменшується відсоток часової нестабільності при постійному вигині.

Максимальне одержане у роботі значення тензочутливості (0,196%) спостерігається для зразку 1М, що перевищує відповідне значення для промислового еталонного зразку у 6 разів (0,033%). Таким чином, оптимальними геометричними та технологічними параметрами є наступні: ширина, довжина, товщина нікелевої шини (1мм*15мм*0,2мкм), номінальний опір нікелевої шини 439 Ом, осадження нікелевого шару крізь магнітну маску.

Одержані у роботі експериментальні результати можуть бути використані у подальшому для розробки технології синтезу гнучких тензорезистивних сенсорів механічних полів на основі nanoцелюлози.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Таблиця 6.1 Перелік посилань

Характеристика джерела	Джерело
Книга	<p>Азаров В.І. - Хімія деревини і синтетичних полімерів / В.І. Азаров, А.В. Бурав, А.В. Оболенська. СПб .: Сплат, 1999. – 628 с.</p> <p>Кузнєцова З.І. Методи дослідження целюлози. Рига: Знатне, 1981.-258 с.</p>
Стаття	<p>Зиміна Т.М., Соловійов А.В., Лучинні В.В., Муратова Е.Н., Кава Л.А., Хамдулаєва Г.Н. Принципи створення гнучких мініатюрних пристроїв для вирощування колоній мікроскопічних клітин на основі пористого анодного оксиду алюмінію. // Нано- і мікросистемна техніка. – 2013. – С.19– 34.</p> <p>Тищенко К.В., Великодній Д.В., Проценко С.І. Комплекс для автоматичного дослідження тензорезистивних властивостей тонкоплівкових структур // Спарник трудові IX Международной научно-практической конференции «Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments». – 2010. – С. 304 – 306.</p> <p>Коваленко В. І. Кристалічна целюлоза: структура та водневі зв'язки // Успіхи хімії. 2010. – Т. 79. – №3. – С. 261– 272.</p>

Продовження таблиці 6.1

	<p>Москва В.В. Розчинники в органічній хімії // Боровський освітній журнал. 1999. - № 4. - С. 44-50.</p> <p>Базарнова Н.Г. Методи дослідження деревини і її похідних / Н.Г. Базарнова, Е.В. Карпова, І.Б. Катраков, В.І. Маркін, І.В. Микушина, Ю.А. Ольхов, С.В. Худенко. Барнаул: Видавництво Алтайського Держ. Університету, 2002. - 160 с.</p> <p>Єршов Б.Г. Радіаційна хімія целюлози / Б.Г. Єршов, А.С. Климентов // Успіхи хімії. 1984. - Т.53. - С. 2056-2077.</p> <p>Єршов Б. Г. Радіаційно-хімічна деструкція целюлози та інших полісахаридів // Успіхи хімії. 1998. - Т.67. - С. 353-375.</p> <p>Панов В.П. Внутрішньо-і міжмолекулярні взаємодії в вуглеводах / В.П. Панов, Р.Г. Жбанков. Мінськ: Наука і техніка, 1988. - 359 с.</p> <p>Завадський А.Є. Рентгенографічний метод визначення ступеня кристалічності целюлозних матеріалів різної анізотропії // Хімічні волокна. 2004. - №6. - С. 28-32.</p>
Монографія іноземною мовою	<p>Lee W., Kim J., Kim Y.-H., High-performance InO_x/GaO_x bilayer channel thin-film transistors made using persistent high-surface-energy induced by photochemical activation // Nano Lett. – 2017, V. 188. – P. 627 – 632</p>

Habibi Y. Bionanocomposites based on poly (epsilon-caprolactone) -grafted cellulose nanocrystals by ring-opening polymerization / Y. Habibi, A.L. Goffin, N. Schiltz, E. Duquesne, P. Dubois, A. Dufresne // J. Mater. Chem. 2008. – №18. – P. 5002-5010.

Petersson L. Structure and thermal properties of poly (lactic acid) / cellulose whiskers nanocomposites materials / L. Petersson, I. Kvien, K. Oksman // Compos. Sci. Technol. 2007. – V. 67. – P. 2535– 2544.

Rojas O.J. Electronspun nanocomposites from polystyrene loaded with cellulose nanowhiskers / O.J. Rojas, G.A. Montero, Y. Habibi // Appl. Polym. Sci. 2009. - V. 113. P. 927-935.

Pandey J.K. Evaluation of morphological architecture of cellulose chains in grass during conversion from macro to nano dimensions / J.K. Pandey, S.C. Kim, C.S. Chu, C.S. Lee, D.J. Jang, S.H. Ahn // e-Polymer. 2009. -V. 102. - P. 1-15.

Oksman K. Manufacturing process of cellulose whiskers / polylactic acid nanocomposites / K. Oksman, A.P. Mathew, D. Bondeson, I. Kvien // Compos. Sci. Technol. 2006. - V. 66. - P. 2776-2784.

Paralikar S.A. Polyvinylalcohol / cellulose nanocrystals barrier membranes / S.A. Paralikar, J. Simonsen, J. Lombardi // J. Membr. Sci. 2008. - V. 320. - P. 248-258.

Продовження таблиці 6.1

Mangalam A.P. Cellulose / DNA hybrid nanomaterials / A.P. Mangalam, J. Simonsen, A. Benight // Biomacromolecules. 2009. - V. 10. - P. 497-504.

Grunert M. Nanocomposites of cellulose acetate butyrate reinforced with cellulose nanocrystals / M. Grunert, W. T. Winter // J. Polym. Envir. 2002. - V. 10.-P. 27-30.

Morandi G. Cellulose nanocrystals grafted with polystyrene chains through surface-initiated atom transfer radical polymerization (SI-ATRP) / G. Morandi, L. Heath, W. Thielemans // Langmuir. 2009. - V. 25. - P. 8280-8286.

Bondeson D. Optimization of the isolation of nanocrystals from microcrystalline cellulose by acid hydrolysis / D. Bondeson, A. Mathew, K. Oksman // Cellulose. -2006.-V. 13.-P. 171-180.

Filson P.B. Sono-chemical preparation of cellulose nanocrystals from lignocellulose derived materials / P.B. Filson, B.E. Dawson-Andoh // Biores. Technol. 2009. - V. 100. - P. 2259-2264.

Braun B. Cellulosic nanowhiskers. Theory and application of light scattering from poly disperse spheroids in the Rayleigh-Gans-Debye regime / B. Braun, J.R. Dorgan, J.R. Chandler // Biomacromoleucules. 2008. - V. 9. - P. 1255-1263.

Продовження таблиці 6.1

Dufresne A. Cellulose-based composites and nanocomposites / A. Dufresne, A. Gandini, M.N. Belgacem // Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources. 2008. - № 1. - P. 401-418.

Dufresne A. Thermoplastic nanocomposites filled with wheat straw cellulose whiskers. Part II. Effect of processing and modeling / A. Dufresne, J.Y. Cavaille, W. Helbert // Polym. Compos. 1997. - V. 18. - P. 198-210.

Alemdar A. Biocomposites from wheat straw nanofibers: Morphology, thermal and mechanical properties / A. Alemdar, M. Sain // зітри. Sci. Technol. -2008.-V. 68.-P. 557-565.

Bai W. A technique for production of nanocrystalline cellulose with a narrow size distribution / W. Bai, J. Holbery, K. Li // Cellulose. 2009. - V. 16. -P. 455- ^ 65.

Dong X.M. Effects of ionic strength on the isotropic-chiral nematic phase transition of suspensions of cellulose crystallites / X.M. Dong, T. Kimura, J.F. Revol, D.G. Gray // Langmuir. 1996. - V. 12. - P. 2076-2082.

Moran J.I. Extraction of cellulose and preparation of nanocellulose from sisal fibers / J.I. Moran, V.A. Alvarez, V.P. Cyras, A. Vazquez // Cellulose. -2008.-V. 15.-P. 149-159.

Araki J. Steric stabilization of a cellulose microcrystal

Продовження таблиці 6.1

	<p>suspension by polyethylene glycol grafting / J. Araki, M. Wada, S. Kuga // Langmuir 2001. -V. 17.-P. 21-27.</p> <p>Battista O. A. Microcrystalline Cellulose / O.A. Battista, P.A. Smith // Ind. Eng. Chem. 1962, P. 54, 9, 20–29</p> <p>Cappella B. Force-distance curves by atomic force microscopy // Surface Science Reports. 1999. - №1. - P. 34.</p>
Перекладна книга	<p>Тензорезистивних ефект // Велика радянська енциклопедія: [в 30 т.] / Гл. ред. А. М. Прохоров. – 3-є вид. – М.: Радянська енциклопедія, 1969– 1978.</p> <p>Пасинков В.В., Сорокин В.С. «Материалы электронной техники» - издательство «Лань», 2003 г. – 368 стр.</p>
Довідник	<p>Гончаров А.І., Серeda І.П. Хімічна технологія. Ч.2. – Київ: Вища шк., 1980. – 280с.</p> <p>Оболенська А.В. Лабораторні роботи по хімії деревини і целюлози / А.В. Оболенська, З.П. Ільницька, А.А. Леонович. М .: Екологія, 1991.-320 с.</p> <p>Кришко А.П. Курс аналітичної хімії. Кількісний аналіз / А.П. Кришко, А.А. Ярославe. М .: Хімія, 1982. - 312 с.</p>
Навчальний посібник	<p>Миронов В.Л. Основи скануючої зондової мікроскопії // Навчальний посібник для студентів старших курсів вищих навчальних закладів. -Нижній Новгород: ІФМ, 2004. 110 с.</p>

Продовження таблиці 6.1

	Тагер А.А. Фізико хімія полімерів. - М .: Науковий світ, 2007. - 573 с.
--	---